



João Pedro Pereira de Oliveira de Castro Martins

Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

Implementação de um Padrão Primário para Medição de Caudais de Gás até 12 L/min

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Auxiliar, FCT-UNL-DEMI

Co-orientador: Mestre Elsa Maria Isqueiro Batista,
Responsável pelo Laboratório de Volume e Caudal, IPQ

Júri

Presidente: Prof. Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas
Arguentes: Doutor Olivier Alain Gerárd Penedo Pellegrino
Prof. Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos
Vogal: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2017

Implementação de um Padrão Primário para Medição de Caudais de Gás até 12 L/min

Copyright:

João Pedro Pereira de Oliveira de Castro Martins, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Esta dissertação é devedora de muitas ajudas e agradecimentos. Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Rui Martins (FCT-UNL/DEMI) por ter aceite a sua orientação e o longo acompanhamento de todo o trabalho. Sempre manifestou total disponibilidade em responder às minhas dúvidas e me atender em todas as dificuldades que fui superando.

Quero igualmente agradecer à Doutora Elsa Batista, responsável pelo Laboratório de Volume e Caudal do Instituto Português da Qualidade, pelo seu acompanhamento ao longo do estágio e pela atenção que sempre me dispensou a fim de que esta minha tese pudesse chegar a bom termo.

Agradeço igualmente à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), especialmente aos professores que contribuíram para a minha formação académica ao longo de todos os anos do curso e tornaram possível a realização deste trabalho.

Não poso deixar de prestar o meu reconhecimento à Andreia Furtado e ao Pedro Conceição pela ajuda que me deram durante todo o tempo que estive a estagiar e na elaboração do meu trabalho no Instituto Português da Qualidade,

O meu reconhecimento vai igualmente para a senhora Adelaide Rodrigues e a toda a equipa de pessoas que compõem o departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade, pela ajuda prestada e por toda a simpatia, que em muito contribuiu para poder concluir esta minha dissertação.

Um agradecimento especial também a todos os colegas que estagiaram comigo no IPQ e que contribuíram para um bom ambiente de trabalho durante todo o estágio e nesta reta final. Quero igualmente recordar todos os amigos que fiz durante todo o meu curso e os colegas com quem tive a oportunidade de trabalhar, trocar impressões e conviver.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos aqueles que estiveram sempre presentes ao longo de todo o meu percurso académico, principalmente os meus pais, a minha irmã e a minha namorada, pelos conselhos e incitamentos a prosseguir no curso que me havia proposto.

Resumo

O presente trabalho descreve a implementação e funcionamento de um padrão primário de medição de caudal de gás, realizado em parceria pelo Laboratório de Volume e Caudal (LVC) e o Laboratório de Gases de Referência (LGR) do Instituto Português da Qualidade (IPQ) com o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), com o objetivo de permitir e assegurar a rastreabilidade na calibração de equipamentos, nomeadamente caudalímetros de gás, no Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade.

O projeto teve como objetivo final tornar funcional um sistema de padrão primário de medição de caudal de gás para operar caudais entre 1 L/min e 12 L/min.

Após o projeto e a montagem do sistema, foi calibrado um controlador de caudal *El-Flow* para vários caudais, em dias diferentes, de forma a avaliar a repetibilidade e reprodutibilidade do conjunto padrão-instrumento de medição.

Para a obtenção de resultados adequados nos ensaios efetuados, foi necessário monitorizar as condições ambientais, tais como a temperatura e a pressão atmosférica do laboratório onde foi instalado o padrão. Para esse efeito foram utilizados equipamentos calibrados.

Outro aspeto importante do trabalho realizado foi a caracterização das fontes de incerteza, que permitiram a obtenção de um resultado completo da medição. Neste projeto foram tidas em consideração várias fontes de incerteza, tais como as referentes aos valores da temperatura, pressão atmosférica, aceleração da gravidade, pressão interna do *Vol-U-Meter* e a incerteza associada aos sensores fotoelétricos do *Vol-U-Meter*.

Os resultados obtidos permitiram verificar que os valores dos erros e incertezas dos caudais estudados estavam de acordo com o esperado, havendo boa estabilidade do equipamento em estudo, concluindo-se assim que o mesmo poderá ser utilizado como padrão primário para calibração de caudalímetros de gás.

Palavras-chave:

Controlador de Caudal, Incerteza, Medição de Caudal de Gás, Metrologia.

Abstract

This project describes the method of operation and installation of a primary standard for gas flow measurement carried out in partnership by the Volume and Flow Laboratory (LVC) and the Reference Gases Laboratory (LGR) of the Portuguese Institute for Quality (IPQ) with the Department of Mechanical and Industrial Engineering (DEMI) - Faculty of Sciences and Technology, New University of Lisbon (FCT / UNL), allowing the traceability in the calibration of gas flow meters, in the National Metrology Laboratory of the Portuguese Institute for Quality.

The project aimed to install and make functional a primary standard system for gas flow measurement to operate between 1 L/min and 12 L/min.

After the assembly of the system, an EI-Flow flow controller was calibrated at various flow rates on different days to evaluate the repeatability and reproducibility of the measurements performed.

In order to obtain the adequate results on the tests carried out, it was necessary to monitor the environmental conditions of the laboratory where tests were done, such as temperature and pressure. To achieve this purpose calibrated equipment was also used.

Another important measurement factor was the characterization of uncertainty sources, which would allow obtaining a complete result for the measurement. Hence, several sources of uncertainty were taken into account, such as those related with temperature, air pressure, gravity, pressure inside the Vol-U-Meter, and the uncertainty associated with the photo-electric sensors of the Vol-U-Meter.

The results obtained allowed to verify that the values of the errors and uncertainties of the studied flows were in agreement with the expected, as well as the good stability of the equipment under study, concluding that it can be used as a primary standard for calibration of gas flowmeters.

Keywords:

Flow Controller, Gas Flow Measurement, Metrology, Uncertainty.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação, Objetivo e Justificação do Tema	1
1.2 Metodologia de Desenvolvimento	2
1.3 Estrutura do Documento	3
Capítulo 2 – Enquadramento	7
2.1 – Sistema Português da Qualidade	7
2.2 – Instituto Português da Qualidade	8
2.2.1 – Departamento de Metrologia	9
2.2.2 – Laboratório de Volume e Caudal	12
2.3 – Termos e Definições Metrologicas Utilizadas	13
Capítulo 3 – Equipamento de Volume e Caudal	17
3.1 – Volume	17
3.1.1 – Equipamento Volumétrico	18
3.1.2 – Calibração de Equipamento Volumétrico	19
3.2 – Caudal	22
3.2.1 - Equipamento de Medição de Caudal	23
3.2.2 – Calibração de Caudalímetros	29
3.3 – Sistema escolhido para medição de caudal de gás	30
3.3.1 – Padrão	30
3.3.2 – Caudalímetro	33
Capítulo 4 – Cálculo de Incertezas	37
4.1 – Incerteza de Medição	38
4.2 – Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandezas de Entrada	39
4.2.1 – Avaliação de Tipo A	39
4.2.2 – Avaliação de Tipo B	40
4.3 – Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandezas de Saída	42
4.4 – Incerteza Expandida	43
4.5 – Determinação da Incerteza na Medição de Caudal	45

4.5.1 – Fontes de Incerteza que Influenciam a Medição	45
4.5.2 – Modelo de Cálculo do Caudal Volúmico	46
4.5.3 – Coeficientes de Sensibilidade (Derivadas Parciais)	47
4.5.4 – Incerteza-padrão	48
i. Incerteza-padrão associada ao caudal	48
ii. Incerteza-padrão associada à pressão no <i>piston prover</i>	49
iii. Incerteza-padrão associada à temperatura no <i>piston prover</i>	49
iv. Incerteza-padrão associada a pressão atmosférica	49
v. Incerteza-padrão associada à temperatura ambiente.....	49
vi. Incerteza associada à resolução do caudalímetro	49
vii. Incerteza associada à repetibilidade	50
4.5.5 – Incerteza Combinada	50
4.5.6 – Incerteza Expandida	51
Capítulo 5 – Procedimento Experimental.....	53
5.1 – Rastreabilidade	54
5.2 – Calibração de Caudalímetros de Gás	54
5.2.1 – Padrões e Equipamentos de Trabalho	54
5.2.2 – Condições de Referência.....	57
5.2.3 – Modo Operatório	58
5.2.4 – Procedimento Experimental	61
5.2.5 – Apresentação de resultados	63
Capítulo 6 – Análise e Discussão de Resultados	65
6.1 – Sistema padrão de medição de caudal de gás	65
6.1.1 – Estabilidade do padrão	65
6.1.2 – Gás e adaptadores de caudal utilizados	71
6.2 – Calibração de caudalímetros de gás	72
6.2.1 – Cálculo de erros	72
6.2.2 – Cálculo das incertezas associadas a cada caudal	74
6.2.3 – Erros e incertezas do caudalímetro para cada caudal	75
6.3 – Análise e comparação de resultados	76
Capítulo 7 – Validação do Método	79

7.1 – Repetibilidade	79
7.2 – Reprodutibilidade	82
Capítulo 8 – Conclusões e Sugestões	85
Referências Bibliográficas	89
Anexos.....	91
Anexo A – Imagens do Projeto em CAD	92
Anexo B – Matriz de Calibração	101
Anexo C – Tabelas e Gráficos de valores obtidos	106
Anexo C.1 – Tabelas e Gráficos da Estabilidade do Padrão.....	106
Anexo C.2 – Tabelas dos erros médios nos ensaios efetuados.....	120
Anexo C.3 – Listagem das incertezas calculadas para cada dia de ensaio.....	134
Anexo C.4 – Gráficos da repetibilidade para cada dia de ensaios	139
Anexo C.5 – Gráficos da reprodutibilidade para cada mês	145
Anexo D – Certificados de calibração dos equipamentos	147

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Representação da estrutura do documento	5
Figura 2.1 – Sistema Português da Qualidade	8
Figura 2.2 – Estrutura orgânica do Departamento de Metrologia.....	11
Figura 2.3 – Laboratório de pequenos volumes.....	12
Figura 2.4 – Laboratório de grandes volumes	12
Figura 2.5 – Medição de Caudal	12
Figura 3.1 – Balão volumétrico (recipiente para conter)	18
Figura 3.2 – Proveta (recipiente para conter)	18
Figura 3.3 – Recipiente graduado de combustível (recipiente para conter)	18
Figura 3.4 – Pipetas (recipiente para escoar)	18
Figura 3.5 – Buretas (recipiente para escoar).....	18
Figura 3.6 – Padrões volumétricos de 1000L (recipiente para escoar)	18
Figura 3.7 – Gasómetro	24
Figura 3.8 – Esquema do Gasómetro	24
Figura 3.9 – <i>Piston prover</i>	25
Figura 3.10 – <i>Piston prover</i> em detalhe	25
Figura 3.11 – Caudalímetro de área variável	26
Figura 3.12 – Diferentes tipos de caudalímetros de área variável.....	26
Figura 3.13 – Desenho esquemático de um caudalímetro de área variável	26
Figura 3.14 – Caudalímetro de hélice	26
Figura 3.15 – Desenho esquemático de um caudalímetro de hélice.....	26
Figura 3.16 – Caudalímetro de turbina	26
Figura 3.17 – Pormenor das pás da turbina num caudalímetro de turbina	26
Figura 3.18 – Desenho esquemático de um caudalímetro de turbina	26
Figura 3.19 – Caudalímetro digital de diferença de pressão	27
Figura 3.20 – Caudalímetro de diferença de pressão.....	27
Figura 3.21 – Caudalímetro industrial de diferença de temperatura.....	27
Figura 3.22 – Caudalímetro de laboratório de diferença de temperatura	27
Figura 3.23 – Esquema do interior de um caudalímetro de diferença de temperatura	27
Figura 3.24 – Caudalímetro magnético	28
Figura 3.25 – Desenho esquemático de um caudalímetro magnético.....	28
Figura 3.26– Caudalímetro.....	28
Figura 3.27 – Aplicação de um caudalímetro ultra-sónico.....	28
Figura 3.28 – Desenho esquemático de um caudalímetro ultra-sónico.....	28
Figura 3.29 – Caudalímetro de vórtice	29
Figura 3.30 – Desenho esquemático de um caudalímetro de vórtice.....	29

Figura 3.31 – Caudalímetro de Coriólis	29
Figura 3.32 – Caudalímetro de Coriólis de laboratório	29
Figura 3.33 – Desenho esquemático de um caudalímetro de Coriólis	29
Figura 3.34 – Garrafa de azoto	31
Figura 3.35 – Garrafa de azoto em <i>Solidworks</i>	31
Figura 3.36 – Mano-redutor e torneira montados na garrafa de azoto	31
Figura 3.37 – <i>Piston prover</i> Brooks Vol-U-Meter	31
Figura 3.38 – <i>Piston prover</i>	31
Figura 3.39 – Cilindro do <i>Piston prover</i> Brooks Vol-U-Meter em <i>Solidworks</i>	31
Figura 3.40 – Interior do cilindro.....	32
Figura 3.41 – Adaptador para controlo de caudal de gás	32
Figura 3.42 – Adaptador de 2,5 mm para controlo de caudal de gás em <i>Solidworks</i>	32
Figura 3.43 – Adaptador de 5 mm para controlo de caudal de gás em <i>Solidworks</i>	32
Figura 3.44 – Caudalímetro Bronkhorst	34
Figura 3.45 – Caudalímetro Bronkhorst em <i>Solidworks</i>	34
Figura 3.46 – Princípio de funcionamento dos caudalímetros de diferença de temperatura	34
Figura 4.1 – Distribuição Normal.....	41
Figura 4.2 – Distribuição Retangular.....	41
Figura 4.3 – Distribuição Triangular	42
Figura 5.1 – Montagem do Sistema	53
Figura 5.2 – Cadeia de Rastreabilidade.....	54
Figura 5.3 – Garrafa de azoto com mano-redutor.....	55
Figura 5.4 – Garrafa de azoto com mano-redutor em <i>Solidworks</i>	55
Figura 5.5 – <i>Piston prover</i> Brooks.....	55
Figura 5.6 – <i>Piston prover</i> Brooks em <i>Solidworks</i>	55
Figura 5.7 – Adaptador para controlo de caudal de gás	56
Figura 5.8 – Adaptador para controlo de caudal de gás – 2,5 mm de diâmetro (<i>Solidworks</i>)....	56
Figura 5.9 – Adaptador para controlo de caudal de gás – 5 mm de diâmetro (<i>Solidworks</i>).....	56
Figura 5.10 – <i>Flow DDE</i>	58
Figura 5.11 – <i>Flow View</i>	59
Figura 5.12 – <i>Flow Plot</i>	59
Figura 5.13 – Esquema da montagem do sistema	60
Figura 5.14 – Pasta dos ficheiros do programa <i>Flow Plot</i>	62
Figura 6.1 – Gráfico da estabilidade do padrão 1 L/min - 05 de junho de 2015	66
Figura 6.2 – Gráfico da estabilidade do padrão 2 L/min - 05 de junho de 2015	67
Figura 6.3 – Gráfico da estabilidade do padrão 4 L/min - 05 de junho de 2015	67
Figura 6.4 – Gráfico da estabilidade do padrão 6 L/min - 05 de junho de 2015	68
Figura 6.5 – Gráfico da estabilidade do padrão 8 L/min - 05 de junho de 2015	68
Figura 6.6 – Gráfico da estabilidade do padrão 12 L/min - 05 de junho de 2015.....	69
Figura 6.7 – Gráfico do erro médio do caudalímetro para diferentes caudais.....	75

Figura 6.8 – Gráfico da comparação dos valores de laboratório com os valores de fábrica.....	77
Figura 7.1 – Gráfico da repetibilidade do caudalímetro - 05 de juho de 2015.....	80
Figura 7.2 – Grafico da repetibilidade do caudalímetro - 26 de agosto de 2015.....	80
Figura 7.3 – Grafico da repetibilidade do caudalímetro - 28 de outubro de 2015	81
Figura 7.4 – Grafico da repetibilidade do caudalímetro - 30 de dezembro de 2015.....	81
Figura 7.5 – Gráfico da reprodutibilidade do caudalímetro	82

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Fator de expansão k para diferentes n.º de graus de liberdade efetivos	44
Tabela 4.2 – Componentes de incerteza associadas à calibração de caudalímetro.....	46
Tabela 4.3 – Componentes de incerteza associadas à calibração de caudalímetro.....	47
Tabela 4.4 – Componentes de incerteza combinada.....	51
Tabela 5.1 – Adaptador de controlo de caudal de gás à saída de acordo com cada caudal	60
Tabela 6.1 – Estabilidade do padrão - 05 de junho de 2015	69
Tabela 6.2 – Estabilidade do padrão - 26 de agosto de 2015	70
Tabela 6.3 – Estabilidade do padrão - 28 de outubro de 2015.....	70
Tabela 6.4 – Estabilidade do padrão - 30 de dezembro de 2015.....	71
Tabela 6.5 – Erro médio do caudalímetro (%) para diferentes caudais.....	73
Tabela 6.6 – Incertezas expandidas do caudalímetro (%) para diferentes caudais	74
Tabela 6.7 – Erro médio e incerteza expandida do caudalímetro (%) para cada caudal	76
Tabela 6.8 – Erro médio e incerteza expandida do caudalímetro (%) – valores de fábrica	76

Lista de Siglas e Abreviaturas

BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*

CAD - *Computer-Aided Design*

CIPM – *Comité International des Poids et Mesures*

DEMI – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

DMET – Departamento de Metrologia

EN – *European Standards*

EURAMET – *European Association of National Metrology Institutes*

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IFCC – *International Federation of Clinical Chemistry*

IPQ – Instituto Português da Qualidade

IPAC – Instituto Português de Acreditação

ISO – *International Organization for Standardization*

IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*

IUPAP – *International Union of Pure and Applied Physics*

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

LCM – Laboratório Central de Metrologia

LGR – Laboratório de Gases de Referência

LVC – Laboratório de Volume e Caudal

NP – Normas Portuguesas

OIML – *Organisation Internationale e de Métrologie Légale*

SI – Sistema Internacional da Unidade de Medida

SPQ – Sistema Português da Qualidade

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

VSL – *Dutch Metrology Institute*

Lista de Símbolos

a	Valores extremos associados a uma variabilidade
a^-	Limite inferior associado a uma variabilidade
a^+	Limite superior associado a uma variabilidade
A	Área
c_i	Coeficiente de sensibilidade em relação à grandeza de entrada X_i
d	Massa volúmica
f	Função modelo
I_L	Resultado da pesagem com o recipiente cheio com água
I_E	Resultado da pesagem com o recipiente vazio
k	Fator de expansão para o cálculo da incerteza expandida
K	Fator de correção para o cálculo do volume em condições normais
m	Massa
n	Número de observações
P_i	Pressão no <i>piston prover</i>
P_n	Pressão atmosférica
q	Valor lido de caudal
\bar{q}	Valor médio de caudal
Q	Caudal
Q_v	Caudal volumétrico
Q_m	Caudal mássico
R	Resolução do instrumento
s	Desvio-padrão
$s_{(q)}$	Desvio-padrão experimental
t	Tempo
t_i	Tempo de recolha
T	Temperatura do fluido (líquido ou gás) utilizado na calibração
T_0	Temperatura de referência

T_{0R}	Temperatura de referência do recipiente
T_i	Temperatura no <i>piston prover</i>
T_n	Temperatura atmosférica
T_P	Temperatura da água no padrão
T_R	Temperatura da água no recipiente
T_1	Temperatura do fluido no ponto 1
T_2	Temperatura do fluido no ponto 2
u_i	Incerteza-padrão associada ao termo i
$u_i(x)$	Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de entrada x
$u_i(y)$	Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y
$u(x_i; x_j)$	Covariância estimada
$u(Q_v)$	Incerteza-padrão associada ao caudal
$u(P_i)$	Incerteza-padrão associada à pressão no <i>piston prover</i>
$u(P_n)$	Incerteza-padrão associada à pressão atmosférica
$u(T_i)$	Incerteza-padrão associada à temperatura no <i>piston prover</i>
$u(T_n)$	Incerteza-padrão associada à temperatura atmosférica
$u(C)$	Incerteza associada à resolução do caudalímetro
$u(R)$	Incerteza associada à repetibilidade do caudalímetro
U	Incerteza de medição expandida
v	Velocidade
v_{ef}	N.º de graus de liberdade efetivos
v_i	N.º de graus de liberdade efetivos da Incerteza-padrão u_i
V	Volume
V_0	Volume à temperatura de referência t_0
V_{20}	Volume obtido através do padrão volumétrico
V_n	Volume em condições normais
V_i	Volume recolhido pelo <i>piston prover</i>
x_i	Estimativa da grandeza de entrada
X_i	Grandeza de entrada

y	Estimativa da grandeza de saída
Y	Grandeza de saída
β_L	Coeficiente de expansão térmica da água
ε	Erro
θ	Ângulo entre o escoamento e a área
ρ_W	Massa volúmica do líquido de calibração, à temperatura de calibração T
ρ_A	Massa volúmica do ar
ρ_B	Massa volúmica de referência das massas da balança
σ	Desvio-padrão
γ	Coeficiente de expansão térmico do material
γ_P	Coeficiente de expansão térmico do material do padrão
γ_R	Coeficiente de expansão térmico do material do recipiente

Capítulo 1 - Introdução

O primeiro capítulo da presente dissertação de Mestrado pretende expor quais as motivações para a realização do tema da tese, assim como os objetivos a atingir com o estudo efetuado e a metodologia de desenvolvimento do mesmo. A estrutura e o conteúdo do documento são também descritos neste capítulo.

1.1 Motivação, Objetivo e Justificação do Tema

Esta dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica foi motivada pela experiência de um estágio feito no Instituto Português da Qualidade (IPQ), onde, de forma prática, o autor da presente dissertação aplicou os estudos teóricos feitos ao longo do curso e onde sentiu necessidade de aprofundar conhecimentos acerca da metrologia e da calibração de equipamentos.

A sociedade e as suas complexas atividades modernas têm vindo a exigir cada vez mais tecnologias metrológicas adequadas à satisfação das suas crescentes necessidades. Basta pensar nas empresas da indústria farmacêutica, de atividades químicas, ou nos equipamentos utilizados na prática quotidiana do fornecimento de energias domésticas e outras, como o gás, a água ou o abastecimento de combustíveis fósseis, que todos consumimos.

A utilização de caudalímetros nos dias de hoje é muito importante. É através destes que é possível saber a quantidade de líquidos ou gases que é escoada num determinado intervalo de tempo, o que permite calcular com rigor o caudal daqueles fluidos e assim os custos e os benefícios da sua utilização.

De forma a garantir que os caudalímetros cumpram o seu papel devidamente, com elevada exatidão e precisão, é necessário que estes instrumentos sejam devidamente calibrados antes da sua utilização, isto é, que apresentem valores mensuráveis semelhantes aos medidos através de padrões utilizados e de acordo com normas de referência.

O IPQ é o laboratório primário de metrologia em Portugal. Assim, de maneira a saber se seria possível criar um novo serviço para o Laboratório de Volume e Caudal desta mesma instituição, este trabalho, feito a partir de um estágio no mesmo Instituto, teve por finalidade estudar a instalação e o correto funcionamento de um equipamento destinado a ser um padrão laboratorial, que permita medir valores constantes de caudal entre 1 L/min e 12 L/min com o objetivo de ser utilizado na calibração de caudalímetros de gás, assegurando a respetiva rastreabilidade ao Sistema Internacional.

Depois de vários ensaios realizados, cujos resultados foram analisados, concluiu-se ser viável a utilização do equipamento disponibilizado pelo IPQ (garrafa de azoto e *piston prover*) para ser um padrão de calibração de caudalímetros de gás, procedendo-se a vários estudos e realizando-se várias tarefas. Em resumo foram feitas as seguintes:

- Teste de estabilidade ao material utilizado neste trabalho por forma a saber se estava em condições de ser utilizado;
- Cálculo dos erros associados aos diferentes caudais em estudo, de modo a encontrar a diferença entre o valor medido pelo padrão e o valor medido pelo equipamento a ser calibrado;
- Estimativa da repetibilidade do caudalímetro e do sistema completo, através da repetição da experiência no mesmo dia e nas mesmas condições por forma a verificar se conduzia aos mesmos resultados;
- Estimativa da reprodutibilidade do caudalímetro e do sistema completo, de modo a verificar se a experiência repetida em dias diferentes levava a resultados iguais;
- Cálculo das incertezas associadas a cada caudal, de modo a verificar o rigor com que se pode efetuar cada medição de caudal por um operador em determinado momento, com um certo instrumento, e nas condições ambientes existentes;

Realizados os testes acima indicados, chegou-se à conclusão que os valores dos respetivos indicadores eram aceitáveis, o que permitiu avançar com alguns dos objetivos específicos para este trabalho:

- Elaboração de uma matriz de calibração, ou seja, de um ficheiro padrão (em *Excel*) que pudesse ser utilizado para o cálculo dos erros e incertezas associados a qualquer tipo de caudalímetro que venha a ser comparado com o equipamento padrão;
- Elaboração de um procedimento de calibração, onde são referidas regras e normas que permitem o uso devidamente correto de todo o sistema;
- Desenho em CAD 3D do sistema de calibração completo para uma melhor compreensão de toda a montagem e apresentação da mesma a futuros utilizadores do sistema.

1.2 Metodologia de Desenvolvimento

O estágio no IPQ foi iniciado com uma formação em metrologia e avaliação de incertezas, de forma a dar a conhecer os instrumentos e métodos utilizados, assim como o tipo de trabalho realizado no Laboratório de Volume e Caudal (LVC) do IPQ. Tipicamente no LVC, são realizados ensaios de cariz estático, mas também ensaios dinâmicos, como é o caso dos

ensaios do projeto em questão, em que os ensaios são de medição de caudal de fluidos. Quer nos ensaios estáticos, quer nos dinâmicos, é possível utilizar o método gravimétrico ou volumétrico para a obtenção de resultados, dependendo, no entanto, do tipo de fluido utilizado. Contudo neste estudo, só foi possível utilizar o método volumétrico, por ser o único viável na medição de caudal de gás.

De forma a se conseguirem cumprir os objetivos, foi necessário realizar ensaios ao sistema padrão de medição para garantir a sua estabilidade. De seguida, com base nos ensaios efetuados, pretendeu-se determinar o erro e incerteza associado a cada caudal.

O método utilizado começou por ser essencialmente empírico, sendo constituído por duas etapas:

- Verificação do estado do material a utilizar, visto tratar-se de aparelhos de que se desconhecia o funcionamento, assim como da capacidade de medição e de indicação de valores seguros e fiáveis.

- Realização de um conjunto de experiências (algumas repetidas várias vezes) de dificuldade crescente, a fim de se elaborarem tabelas e gráficos que iriam servir para o resultado final pretendido.

Seguidamente, com base nas experiências realizadas e organizada uma base de dados de resultados, pôde-se fazer um estudo científico, bem fundamentado, que constituiu a presente dissertação de Mestrado.

1.3 Estrutura do Documento

Este trabalho está dividido em sete capítulos, para uma melhor análise e compreensão do tema em estudo.

O primeiro capítulo, ou introdução, é dedicado a expor com clareza e precisão os objetivos deste trabalho e a indicar o método seguido.

O segundo capítulo faz uma apresentação da Metrologia, a caracterização da organização aonde o estágio foi praticado, dá a conhecer as estruturas da qualidade em Portugal e apresenta as definições de cariz metrológico para enquadrar o projeto na área da metrologia. São ainda abordados todos os termos, definições e métodos relevantes para a compreensão do projeto.

No terceiro capítulo, é descrito o equipamento utilizado, tal como os principais conceitos da tese, os quais permitem uma melhor compreensão do tema desenvolvido.

O quarto capítulo é reservado ao cálculo das incertezas, onde são apresentados os fundamentos teóricos para a determinação e avaliação do erro e da incerteza de medição.

Ainda neste capítulo, é feita a identificação de todas as componentes de incerteza numa medição de caudal de gás.

O quinto capítulo descreve todo o procedimento experimental. São descritos todos os procedimentos laboratoriais e de calibração utilizados no decorrer do estágio, assim como o procedimento concebido para a calibração de caudal metros de gás.

O sexto capítulo, referente à análise e discussão de resultados do caso em estudo, descreve e desenvolve o mesmo, e apresenta os resultados dos ensaios realizados, que serviram de base para a elaboração do procedimento de calibração.

No sétimo capítulo, é feita a validação do método através da apresentação dos resultados de repetibilidade e reprodutibilidade referentes aos ensaios realizados durante este trabalho.

O oitavo capítulo é dedicado à síntese final dos resultados apresentados nos capítulos anteriores. Este capítulo inclui também as conclusões e as sugestões propostas para melhoramentos a efetuar em vista dos benefícios que se pretendem alcançar.

A Figura 1.1 apresenta a estrutura do documento, de uma maneira mais sucinta, tal como os tópicos mais importantes abordados em cada capítulo.

Capítulo 1: Introdução	<ul style="list-style-type: none"> • Introdução ao conteúdo da dissertação: motivação do tema, objetivos, metodologia aplicada e organização do documento
Capítulo 2: Enquadramento	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema Português da Qualidade e Instituto Português da Qualidade • Metrologia • Termos e definições metrologicas
Capítulo 3: Equipamento de Volume e Caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Volume e caudal • Métodos gravimétrico e volumétrico • Padrões utilizados: <i>piston prover</i> e gerador de caudal • Equipamento a calibrar: caudalímetros
Capítulo 4: Cálculo de Incertezas	<ul style="list-style-type: none"> • Incerteza da medição • Incerteza-padrão de estimativa de entrada e de saída; • Incerteza combinada e incerteza expandida • Determinação da incerteza na medição de caudal
Capítulo 5: Procedimento Experimental	<ul style="list-style-type: none"> • Rastreabilidade • Calibração de caudalímetros de gás: padrões e equipamento de trabalho, condições de referencia, modo operativo e seu procedimento
Capítulo 6: Análise e Discussão de Resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Calibração de equipamentos volumétricos • Sistema padrão de medição de caudal de gás • Calibração de caudalímetros de gás: análise do cálculo de erros e incertezas
Capítulo 7: Validação do Método	<ul style="list-style-type: none"> • Análise da repetibilidade do caudalímetro • Análise da reprodutibilidade do caudalímetro
Capítulo 8: Conclusões e Sugestões de Melhoramento	<ul style="list-style-type: none"> • Conclusões a que se chegou após o estudo efetuado • Sugestões para trabalhos futuros

Figura 1.1 - Representação da estrutura do documento

Capítulo 2 – Enquadramento

2.1 – Sistema Português da Qualidade (SPQ)

O Sistema Português da Qualidade (SPQ) apresentado na Figura 2.1 define-se como o conjunto integrado de entidades e organizações interrelacionadas e interatuastes que, seguindo princípios, regras e procedimentos aceites internacionalmente, congrega esforços para a dinamização da qualidade em Portugal e assegura a coordenação dos três subsistemas - normalização, qualificação e metrologia - com vista ao desenvolvimento sustentado do País e ao aumento da qualidade de vida da sociedade em geral [1].

- Normalização – é o subsistema do SPQ que enquadra as atividades de elaboração de normas e outros documentos de carácter normativo de âmbito nacional, europeu e internacional [2].

Existem vários tipos de normas, em função do nível de abrangência do organismo de normalização responsável pela sua publicação. De entre estas, destacam-se as normas portuguesas (NP), as normas europeias (EN) e as normas internacionais (ISO) [1].

- Qualificação – é o subsistema do SPQ que enquadra as atividades da acreditação, da certificação e outras de reconhecimento de competências e de avaliação da conformidade, no âmbito do SPQ [2].

Este subsistema tem como objetivo a demonstração da conformidade de produtos, de serviços e de sistemas da qualidade com requisitos previamente fixados, assim como a acreditação de entidades para fins específicos. A acreditação consiste no procedimento de reconhecimento formal de competência de uma entidade a nível técnico para a realização de uma determinada atividade, sendo o instituto português de acreditação o organismo nacional de acreditação [1].

- Metrologia – é o subsistema do SPQ que garante o rigor e a exatidão das medições realizadas, assegurando a sua comparabilidade e rastreabilidade, a nível nacional e internacional, e a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões das unidades de medida [2].

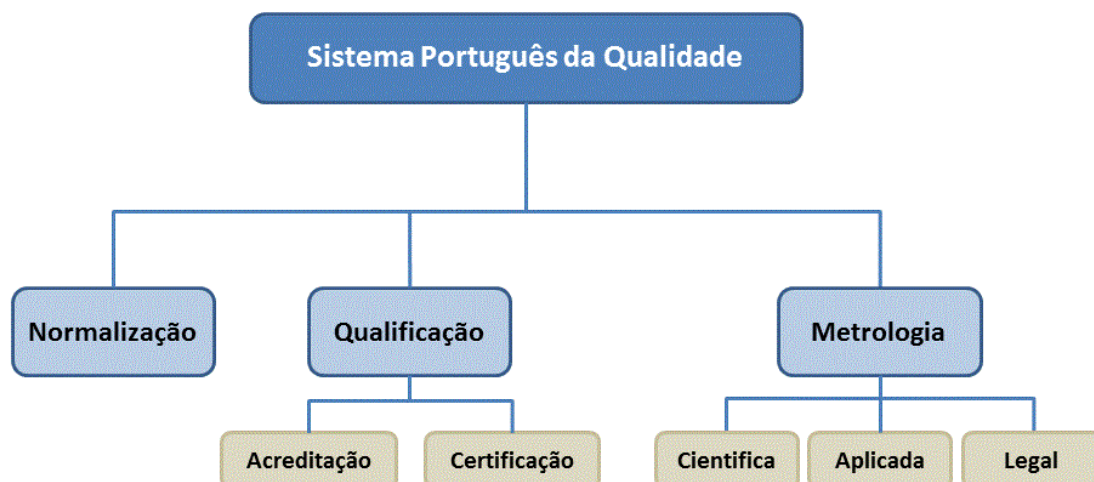


Figura 2.1 – Sistema Português da Qualidade

2.2 – Instituto Português da Qualidade (IPQ)

O Instituto Português da Qualidade, (IPQ), é um instituto público que, nos termos da sua lei orgânica aprovada pelo Decreto-Lei 71/2012, de 21 de março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 80/2014, de 15 de Maio, tem por missão a coordenação do Sistema Português da Qualidade (SPQ) e de outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei, a promoção e a coordenação de atividades que visem contribuir para demonstrar a credibilidade da ação dos agentes económicos, bem como o desenvolvimento das atividades necessárias à sua função de laboratório nacional de metrologia [3].

Enquanto Organismo Nacional Coordenador do Sistema Português da Qualidade, são atribuições do IPQ a gestão, coordenação e desenvolvimento do Sistema Português da Qualidade, numa perspetiva de integração de todas as componentes relevantes para a melhoria da qualidade de produtos, de serviços e de sistemas da qualidade e da qualificação de pessoas [2].

Como Organismo Nacional de Normalização ao IPQ compete, designadamente, promover a elaboração de normas portuguesas, garantindo a coerência e atualidade do acervo normativo nacional e promover o ajustamento de legislação nacional sobre produtos às normas da União Europeia [2].

Ao IPQ compete também, enquanto Instituição Nacional de Metrologia, garantir o rigor e a exatidão das medições realizadas, assegurando a sua comparabilidade e rastreabilidade, a nível nacional e internacional, e a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões das unidades de medida [2], sendo por sua vez a entidade responsável pela gerência do Laboratório Central de Metrologia e do Museu de Metrologia.

No âmbito do Sistema Português da Qualidade, o IPQ é a entidade responsável pela informação técnica na área da qualidade, pela acreditação de entidades, sendo também o organismo que assegura a gestão de programas de apoio financeiro e intervém na cooperação com outros países no domínio da Qualidade [4].

No âmbito regulamentar, para além do controlo Metrológico em Portugal, o IPQ é responsável pelo cumprimento dos procedimentos das diretivas comunitárias cuja aplicação acompanha e pelo processo de notificação prévia de normas e regras técnicas no âmbito da União Europeia e da Organização Mundial do Comércio [4].

2.2.1 – Departamento de Metrologia (DMET)

A metrologia é definida como a ciência das medições e as suas aplicações. Esta engloba todos os aspetos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação. É a atividade responsável pela calibração de instrumentos de medição garantindo a qualidade de um determinado produto ou serviço [5], abrangendo três atividades importantes e distintas:

- Definição de unidades de medida aceites internacionalmente
- Realização das unidades de medidas através de métodos científicos
- Estabelecimento de cadeias de rastreabilidade para garantir a precisão de uma medição

Por sua vez, a Metrologia pode ser separada em 3 categorias diferentes:

Metrologia Científica – tem como grande objetivo a organização e o desenvolvimento de padrões de medição, assim como a sua manutenção ao mais alto nível, através da realização dos padrões nacionais, participação nas comparações-chave do BIPM e rastreabilidade dos padrões de referência [6]. Estas tarefas são desempenhadas pelos laboratórios primários. Estes laboratórios são reconhecidos internacionalmente para a realização de uma unidade de base da metrologia a um nível primário e participam em comparações internacionais [5].

Metrologia Aplicada – tem como objetivo assegurar o funcionamento adequado dos instrumentos de medição utilizados na indústria, bem como nos processos de produção e ensaio através da calibração de padrões e instrumentos de medição, organização de comparações inter-laboratoriais e participação no sistema de acreditação nacional [6].

Metrologia Legal – é responsável por garantir a exatidão das medições quando estas têm influência na transparência de transações comerciais, de saúde, de proteção ambiental, de segurança e na área fiscal e abrange atividades relacionadas com controlo metrológico dos instrumentos de medição, de execução e aplicação de diretivas e regulamentos [6].

O Departamento de Metrologia, apresentado na Figura 2.2 integrado no Sistema Português da Qualidade, tem como missão assegurar o rigor e a rastreabilidade das medições no território nacional, através dos padrões de medida necessários à indústria e à sociedade portuguesa em geral e contribuir para a construção de uma liderança metrológica europeia no quadro da economia mundial [2].

Tem como principais objetivos:

- Coordenar, desenvolver e manter os Padrões Nacionais de Medida, garantindo a sua rastreabilidade internacional;
- Organizar a cadeia hierarquizada dos padrões de referência das entidades integradas no Subsistema Nacional da Metrologia;
- Participar nas organizações internacionais de metrologia fundamental, aplicada e industrial;
- Participar em ensaios internacionais de comparação inter-laboratorial;
- Apoiar o IPAC nas comparações nacionais dos padrões de referência dos laboratórios metrológicos acreditados;
- Apoiar tecnicamente as operações de controlo metrológico coordenadas pelo Serviço de Metrologia Legal;
- Cooperar com as universidades e centros de saber nacionais e internacionais para o desenvolvimento da metrologia nacional no contexto europeu.

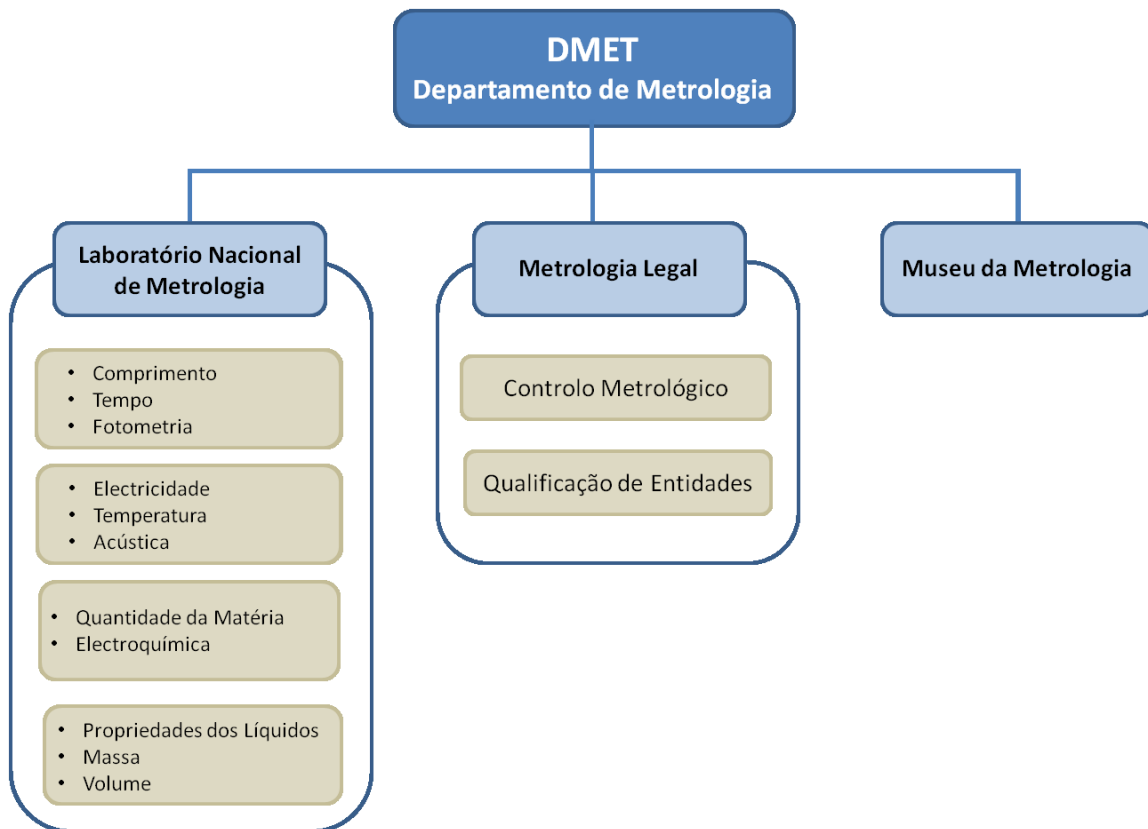


Figura 2.2 – Estrutura orgânica do Departamento de Metrologia

Por sua vez, o Laboratório Nacional de Metrologia, inserido no Departamento de Metrologia, tem a seu cargo a metrologia científica e aplicada do IPQ sendo responsável pelo desenvolvimento do Subsistema Nacional de Metrologia no que respeita aos padrões metroológicos nacionais, através da realização dos padrões nacionais das unidades de medida, da rastreabilidade dos padrões de referência existentes no país, da realização de comparações nacionais e internacionais, desenvolvendo a sua atividade nos seguintes domínios [2]:

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| - Acelerações e Vibrações | - Quantidade da Matéria |
| - Comprimento | - Radiações Ionizantes |
| - Eletricidade e Magnetismo | - Temperatura |
| - Fotometria e Radiometria | - Tempo e Frequência |
| - Massas e Grandezas Derivadas | - Volume e Caudal |
| - Propriedade dos Líquidos | |

2.2.2 – Laboratório de Volume e Caudal

O Laboratório de Volume e Caudal (LVC) do Instituto Português da Qualidade é reconhecido como o topo da cadeia a nível de rastreabilidade em Portugal, na área de volume e caudal, prestando serviços de calibração à indústria, principalmente a organismos de verificação metrológica, laboratórios químicos, analíticos e farmacêuticos [2].

Para além de prestar serviços na área de volume e caudal de gases e líquidos, tem também como funções, a coordenação de comparações nacionais em colaboração com o IPAC, a participação regular nas comparações da *European Association of National Metrology Institutes* (EURAMET) e o desenvolvimento, em parceria com as universidades, de vários trabalhos de validação e melhoramento dos métodos e padrões de calibração [7].

O LVC encontra-se dividido em três áreas distintas: pequenos volumes (Figura 2.3), grandes volumes (Figura 2.4) e caudal (Figura 2.5).

No laboratório de pequenos volumes, efetua-se a calibração de material volumétrico de vidro de 1 ml a 10 L, tais como pipetas, micropipetas, buretas, balões volumétricos, provetas, picnómetros e seringas. São também calibrados instrumentos volumétricos com êmbolo, tais como buretas com êmbolo manual e automático, micro e macro pipetas e dispensadores de 1 μ L a 10 ml [7]. Neste Laboratório, são ainda calibrados no âmbito de caudal de líquidos, instrumentos doseadores de líquidos e caudalímetros de líquidos.

No laboratório de grandes volumes, são calibrados recipientes graduados e volumétricos com capacidade até 5000 L pelo método volumétrico ou gravimétrico [7].



Figura 2.3 – Laboratório de pequenos volumes



Figura 2.4 – Laboratório de grandes volumes



Figura 2.5 – Medição de Caudal

2.3 – Termos e Definições Metrológicas Utilizadas

Os seguintes conceitos são referidos ao longo da dissertação, apresentando-se uma breve descrição dos mesmos. A maioria dos termos foi retirada do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [8].

- **Calibração** – Conjunto de operações que estabelecem em condições específicas a diferença entre valores de grandezas indicadas por um instrumento de medição e o valor indicado pelo padrão utilizado.

- **Caudal volúmico** – Grandeza derivada que representa o escoamento de uma grandeza volúmica quantificável em metros cúbicos por hora (m^3/h), ou em litros por minuto (L/min), ou em mililitros por segundo (mL/s).

- **Condição de repetibilidade de medição** – Condição de medição num conjunto de condições que incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições operativas e a mesma localização, e medições repetidas no mesmo objeto ou objetos similares, num curto intervalo de tempo.

- **Correção** – Compensação de um efeito sistemático estimado.

- **Erro de medição** – Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.

- **Erro máximo admissível** – Valor máximo do erro de medição, que diz respeito a um valor de referência conhecido.

- **Exatidão de medição** – Aproximação entre um valor medido e um valor verdadeiro de uma mensurada.

- **Fator de correção** – Valor que relaciona a pressão no interior do equipamento com a pressão atmosférica em condições normais e a temperatura de um gás no interior do equipamento com a temperatura ambiente em condições normais.

- **Fiabilidade / Precisão de medição** – Aproximação entre indicações ou valores medidos obtidos por medições repetidas no mesmo objeto ou objetos semelhantes em condições especificadas.

- **Fluido** – Substâncias que fluem e podem ser divididas em líquidos e gases. Os líquidos formam uma superfície livre, isto é, quando em repouso, apresentam uma superfície estacionária não determinada pelo recipiente que contém o líquido.

- **Grandeza** – Propriedade de um fenómeno, corpo, ou substância, que se pode exprimir quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência.

- **Incerteza de medição** – Parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensurada a partir das informações usadas.
- **Instrumento de medição** – Dispositivo usado para realizar medições, isolado ou em conjunto com dispositivos complementares.
- **Material volumétrico** – Material usado na medição de volume.
- **Medição** – Processo experimental para obter um ou mais valores razoavelmente atribuíveis a uma grandeza.
- **Mensuranda** – Grandeza que se pretende medir.
- **Metrologia** – Ciência da medição e suas aplicações.
- **Padrão primário** – Padrão estabelecido através de um procedimento de medição primário ou criado como artefacto escolhido por convenção.
- **Procedimento de medição primário** – Procedimento de medição de referência usado para obter um resultado da medição sem relação com um padrão de medição para uma grandeza da mesma natureza.
- **Procedimento de medição** – Descrição detalhada de uma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e um dado método de medição, baseado num modelo de medição e incluindo todos os cálculos para obter um resultado da medição.
- **Rastreabilidade metrológica** – Propriedade de um resultado de medição através do qual o resultado pode ser relacionado a uma referência por intermédio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.
- **Repetibilidade de medição** – Fidelidade de medição para um conjunto de condições de repetibilidade.
- **Reprodutibilidade de medição** – Fidelidade de medição para um conjunto de condições de reprodutibilidade.
- **Resultado de medição** – Conjunto de valores que são atribuídos à mensurada juntamente com qualquer outra informação relevante.
- **Sistema de medição** – Conjunto de um ou mais instrumentos de medição montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos específicos.
- **Tempo de recolha** – Grandeza que indica a duração de enchimento a partir do ponto inicial de recolha de volume até ao ponto final do mesmo.

▪ **Tempo de resposta** – Período de tempo que é necessário esperar depois do escoamento total do instrumento (pipetas de escoamento total) ou antes do acerto final do menisco (buretas e pipetas de escoamento diferencial).

▪ **Unidade de medida** – Grandeza escalar, definida e adotada por convenção, com a qual qualquer outra grandeza da mesma natureza pode ser comparada para exprimir a relação das duas grandezas sob a forma de um número.

▪ **Valor nominal** – Arredondado ou aproximado de uma grandeza que caracteriza um instrumento de medição ou um sistema de medição que serve de guia para a sua utilização.

▪ **Volume** – Grandeza derivada que quantifica o espaço ocupado por um corpo, no espaço tridimensional de um referencial ortogonal. Com unidade derivada do metro, o metro cúbico.

▪ **Volume recolhido** – Quantidade de fluido que entra no equipamento durante o tempo de recolha

Capítulo 3 – Equipamento de Volume e Caudal

Uma medição, independentemente do nível de rigor com que é executada, deve dar origem a um valor e a uma medida do rigor com que foi efetuada. Por sua vez, para se poderem efetuar medições com qualidade e rigor, os equipamentos que as realizam devem estar calibrados por forma a confirmar e garantir que o valor que estão a medir está o mais próximo do valor real.

A calibração é um conjunto de operações que estabelecem em condições específicas a relação/diferença entre valores de grandezas indicadas por um instrumento de medição e o valor indicado pelo padrão utilizado. O resultado de uma calibração tanto permite a atribuição de valores ao instrumento a ser calibrado, identificando o erro de indicação do instrumento de medição, como a determinação de correções relativas às indicações.

Assim, é importante a utilização de equipamentos calibrados por forma a que se consiga determinar a exatidão das leituras dos equipamentos, estabelecer a sua fiabilidade e assegurar a rastreabilidade das medições.

O projeto desenvolvido para a elaboração desta dissertação tem como objetivo a medição de caudal e calibração de contadores/caudalímetros de gás, como já referido anteriormente.

Para isso, foi utilizado um *piston prover*, equipamento constituído por um pistão móvel no interior de uma câmara, na qual é introduzido uma determinada quantidade de gás durante um intervalo de tempo. Este mesmo gás antes de entrar no *piston prover* passa pelo caudalímetro em teste por forma a que este meça o caudal e seja assim possível calibrar o mesmo pelo método volumétrico.

3.1 – Volume

O volume (V) de um corpo é a quantidade de espaço ocupada por esse corpo. É definido como o produto do comprimento pela largura e pela altura (Equação 1), podendo também ser calculado através da razão entre a massa e a massa volúmica do corpo (Equação 2).

$$V = \text{comprimento} \times \text{largura} \times \text{altura} = m \times m \times m = m^3 \quad \text{Equação 1}$$

$$V = \frac{\text{massa } (m)}{\text{massa volúmica } (mv)} = \frac{kg}{kg/m^3} = m^3 \quad \text{Equação 2}$$

A unidade de volume no Sistema Internacional (SI) é o metro cúbico (m^3), definido como sendo o volume de um cubo com as dimensões de 1 metro por aresta. Porém, o litro (L) acaba por ser a unidade mais comum utilizada no dia-a-dia, igual a 1 decímetro cúbico (dm^3) ou a 0,001 metros cúbicos (m^3). Para pequenos volumes, deve utilizar-se o submúltiplo do metro cúbico, ou seja, o centímetro cúbico (cm^3) ou a unidade equivalente, o mililitro (mL).

Devido ao facto de o volume poder ser calculado através do comprimento, como já referido anteriormente, o metro cúbico (m^3) não é considerado uma unidade fundamental do Sistema Internacional (SI).

3.1.1 – Equipamento Volumétrico

Qualquer equipamento com escala graduada utilizado para medir volumes em laboratório, na indústria ou no dia-a-dia, pode ser considerado um equipamento volumétrico. Este pode ser dividido em recipientes para conter líquidos como é o caso dos balões volumétricos, provetas e recipientes graduados (Figura 3.1 a 3.3), ou para escoar líquidos, como as pipetas, buretas ou padrões volumétricos (Figura 3.4 a 3.6), utilizados em laboratório, de acordo com a funcionalidade e utilidade que lhes é atribuída. Para se saber ao certo qual o volume contido ou escoado é necessário que o equipamento volumétrico tenha uma escala de medição e tenha sido previamente calibrado por entidades responsáveis e reguladoras [9].

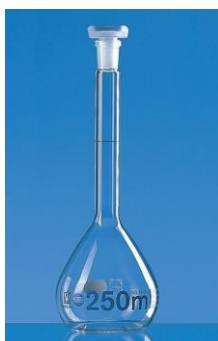


Figura 3.1 – Balão volumétrico (recipiente para conter)



Figura 3.2 – Proveta (recipiente para conter)



Figura 3.3 – Recipiente graduado de combustível (recipiente para conter)



Figura 3.4 – Pipetas (recipiente para escoar)



Figura 3.5 – Buretas (recipiente para escoar)

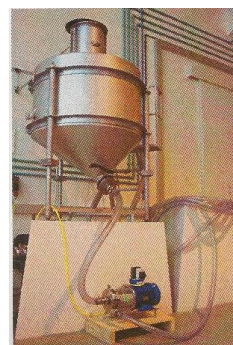


Figura 3.6 – Padrões volumétricos de 1000 L (recipiente para escoar)

3.1.2 – Calibração de Equipamento Volumétrico

A qualidade e a fiabilidade dos resultados analíticos obtidos em laboratório ou na indústria estão em grande parte dependentes do equipamento volumétrico utilizado. Assim, é de extrema importância a sua calibração, visando a quantificação de diferenças entre o valor nominal e o valor verdadeiro, de maneira a que se compreenda quais os erros sistemáticos do processo analítico de medição, para que seja possível proceder à sua correção e minimizar o erro associado [2].

De forma a conseguir resultados o mais exato possível e fiável, é necessário que o equipamento volumétrico esteja calibrado por entidades competentes, através de métodos e padrões adequados. A calibração de equipamento volumétrico consiste na medição do volume contido ou escoado no instrumento de medição quando cheio até ao seu traço de referência [7]. Para tal, é preciso que seja feita da forma mais correta e pelo método mais adequado (método gravimétrico ou método volumétrico). Ambos os métodos são utilizados no laboratório de volumes e caudal do IPQ, sendo o método gravimétrico considerado o método primário mais apropriado na medição de volumes devido à sua grande exatidão e baixa incerteza associada.

Uma das funções do Laboratório de Grandes Volumes do IPQ é a calibração de recipientes volumétricos próprios para a verificação de sistemas de abastecimento de combustíveis, mais conhecidos como bombas de combustível, e contadores de líquidos. Para isso, possui um sistema de calibração, constituído por um banco de padrões volumétricos, previamente calibrados pelo método gravimétrico, que através de um procedimento técnico calibra os recipientes de combustíveis dos vários clientes através do método volumétrico.

No decorrer da iniciação ao estágio, foi facultada uma formação em calibração de equipamentos volumétricos por parte do Instituto Português da Qualidade, de modo a entender o funcionamento dos laboratórios de volume e caudal, tal como adquirir conhecimento base para a calibração de contadores de gás, também conhecidos como caudalímetros. A calibração destes é feita através do método volumétrico, sendo este o tipo de método utilizado ao longo da dissertação.

3.1.2.1– Método Gravimétrico

O método gravimétrico consiste na determinação da massa de água escoada ou contida no recipiente a calibrar na qual se realizam duas pesagens, uma com o recipiente cheio e outra com o recipiente vazio, utilizando água como líquido de calibração à temperatura de referência de $(20 \pm 0,5)$ °C. Assim, para garantir a sua estabilidade, é necessário que esta e o recipiente a calibrar sejam colocados na sala de ensaios a uma temperatura controlada (20 ± 3) °C com 24 horas de antecedência à calibração por forma a que atinja o equilíbrio com a temperatura ambiente. Por forma a evitar qualquer variação de temperatura que possa induzir erros no

resultado, o operador deve manusear o recipiente a calibrar durante o mínimo de tempo possível.

Para além da temperatura de referência, é também importante e necessário ter as condições ambientais mais adequadas na sala de ensaio no decorrer do mesmo. Por sua vez, a limpeza correta da superfície interna dos instrumentos e recipientes de pesagem, não deve ser esquecida, uma vez que a existência de resíduos e impurezas nos mesmos tem influência direta no resultado de uma medição [10].

Este método é um método de elevada exatidão, de pequena incerteza, que não necessita de estruturas específicas, mas que está limitado à capacidade do comparador de massa (balança) utilizado [2].

O volume correspondente à massa escoada ou contida é determinado pela Equação 3 de acordo com a norma NP EN ISO 4787 [10].

$$V_0 = (I_L - I_E) \times \frac{1}{\rho_W - \rho_A} \times \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_B}\right) \times [1 - \gamma(T - T_0)] \quad \text{Equação 3}$$

V_0 - volume, à temperatura de referência T_0	(mL)
I_L - resultado da pesagem com o recipiente cheio com água	(g)
I_E - resultado da pesagem com o recipiente vazio	(g)
ρ_W - massa volúmica do líquido de calibração, à temperatura de calibração T	(g/mL)
ρ_A - massa volúmica do ar	(g/mL)
ρ_B - massa volúmica de referência das massas da balança	(g/mL)
γ - coeficiente de expansão térmica cúbico do material do instrumento a calibrar	(°C ⁻¹)
T - temperatura do líquido utilizado na calibração	(°C)
T_0 - temperatura de referência	(°C)

O erro de indicação do recipiente é a diferença entre o valor do volume indicado na sua escala e o valor de V_0 , ou seja:

$$Erro = V_{escala} - V_0 \quad \text{Equação 4}$$

3.1.2.2– Método Volumétrico

O método volumétrico consiste no vazamento de uma certa quantidade de líquido, de um padrão calibrado, para dentro de um recipiente que possua uma escala amovível em unidades de volume (OIML R 120). É um método bastante expedito, requerendo estruturas específicas como pipetas automáticas ou padrões volumétricos [2].

O padrão de volume (pipeta automática ou recipiente) utilizado na calibração deve ser cheio de água até que esta transborde pelo orifício superior. De seguida esvazia-se totalmente e aguarda-se 15 segundos no caso da pipeta automática e 30 segundos no caso do recipiente. É garantido assim que as paredes internas do padrão utilizado fiquem molhadas após esta 1ª utilização. Novamente volta-se a encher o padrão da mesma forma até que o fluido de calibração transborde e de seguida esvazia-se totalmente este último passando na totalidade o líquido de calibração para o recipiente a ser calibrado, aguardando no final 15 segundos no caso da pipeta automática e 30 segundos no caso do recipiente, por forma a garantir que não caiam mais gotas no recipiente a ser calibrado. Depois desta etapa deve-se medir a temperatura da água.

A temperatura de referência é mais uma vez muito importante, sendo assim necessário ter as condições ambientais adequadas na sala de ensaio. Para isso, é necessário um controlo da humidade e da pressão atmosférica no decorrer do ensaio, sendo que as condições ambientais do laboratório devem ser as seguintes:

- A humidade deve variar entre 30 % e 85 %
- A pressão atmosférica deve variar entre 920 hPa e 1080 hPa
- A temperatura ambiente deve ser controlada, podendo variar entre 17 °C e 23 °C

Posteriormente a ser escoado, e retirado o valor do volume obtido do padrão volumétrico, este é convertido para a temperatura de 20 °C de acordo com a Equação 5 [11].

$$V_{20} = V_0 \times [1 - \gamma_p(T_0 - T_p) + \beta_L(T_R - T_p) + \gamma_R(T_{0R} - T_R)] \quad \text{Equação 5}$$

V_{20} – volume, à temperatura de 20 °C	(mL)
V_0 – volume obtido através do padrão volumétrico	(mL)
γ_p – coeficiente de expansão térmica cúbico do material do padrão	(°C ⁻¹)
T_0 – temperatura de referência do padrão	(°C)
T_p – temperatura da água no padrão	(°C)
β_L – coeficiente de expansão térmica da água	(°C ⁻¹)
T_R – temperatura da água no recipiente	(°C)
γ_R – coeficiente de expansão térmica cúbico do material do recipiente	(°C ⁻¹)
T_{0R} – temperatura de referência do recipiente	(°C)

O erro de indicação do recipiente é dado pela diferença entre o valor do volume lido na sua escala e o valor de V_{20} , de acordo com a Equação 6:

$$Erro = V_{escala} - V_{20} \quad \text{Equação 6}$$

3.2 – Caudal

O caudal (Q) é definido como a quantidade de volume ou massa de fluido que atravessa uma determinada área de superfície por unidade de tempo, ou seja, é a rapidez com que um fluido é escoado, de acordo com a Equação 7 e Equação 8 [11].

Desta forma, o caudal volumétrico (Q_v) está associado à quantidade de volume escoado por unidade de tempo, enquanto o caudal mássico (Q_m) é análogo ao volumétrico, mas medindo a quantidade de massa escoada por unidade de tempo.

As unidades de caudal SI são o metro cúbico por segundo (m^3/s) para o caudal volumétrico, enquanto que para o caudal mássico são o quilograma por segundo (kg/s).

$$Q_v = \frac{\text{volume } (V)}{\text{unidade de tempo } (t)} = \frac{m^3}{s} = m^3/s \quad \text{Equação 7}$$

$$Q_m = \frac{\text{massa } (m)}{\text{unidade de tempo } (t)} = \frac{kg}{s} = kg/s \quad \text{Equação 8}$$

Matematicamente, o caudal [caudal volumétrico (Q_v)] é definido pela velocidade com que um fluido atravessa uma determinada área, com um determinado ângulo θ em relação à perpendicular da área.

Para uma velocidade uniforme (v), através de uma área de escoamento plana, o caudal é dado pela Equação 9:

$$Q = A \times v \times \cos(\theta) \quad \text{Equação 9}$$

No caso particular de um escoamento realizado perpendicularmente à área A , ou seja, quando $\theta = 0$ e $\cos(\theta) = 1$, o caudal pode ser dado simplesmente pela Equação 10:

$$Q = A \times v \quad \text{Equação 10}$$

Quando a velocidade do fluido não é uniforme, ou no caso de a área de escoamento não ser plana, então o caudal tem que ser calculado através de um integral de área como é dado na Equação 11:

$$Q = \iint_S v \cdot dS \quad \text{Equação 11}$$

Tanto o caudal volumétrico como o caudal mássico podem ser mutuamente convertidos através da massa volúmica do fluido. Os fluidos podem ser divididos em líquidos e gases, sendo que no caso dos líquidos a massa volúmica não depende das suas condições; porém, no caso dos gases depende de uma série de fatores como a pressão, a temperatura ou a natureza do gás.

Neste trabalho o azoto (N_2), foi o fluido de calibração utilizado, sendo extremamente importante a determinação da pressão e temperatura durante todo o processo de calibração.

3.2.1 - Equipamento de Medição de Caudal

Na indústria, é necessário a existência de instrumentos de elevada qualidade, como contadores e controladores de fluxo de gás, utilizados na preparação de misturas gasosas ou na área da microeletrónica, que meçam o caudal de um fluido de uma forma rigorosa.

No caso dos contadores de gás, estes instrumentos funcionam através de um princípio baseado no tempo necessário de recolha de uma determinada quantidade conhecida de volume de gás (fluido de calibração) a uma determinada pressão e temperatura, enquanto que os controladores ou medidores de fluxo funcionam através da leitura em tempo real do caudal de gás que os atravessa.

3.2.1.1 – Contadores de Gás

Existem vários tipos de contadores de gás que podem ser utilizados como padrão para a calibração de caudalímetros. Os mais utilizados são o gasómetro e o *piston prover*.

➤ Gasómetro:

O Gasómetro, como se pode ver na Figura 3.7 e na Figura 3.8, é um equipamento utilizado para medir quantidades de gás elevadas com caudais que podem variar entre 15 L/min e 1500 L/min. Este é composto por um reservatório cilíndrico, aberto no topo, que é quase preenchido na totalidade com óleo que serve de vedante. Dentro deste reservatório é introduzido um outro reservatório cilíndrico, mas invertido, ou seja, uma campânula, que é aberto na parte inferior e tem uma forma torisférica no topo. Ao se levantar a campânula, esta deve permanecer em repouso durante pelo menos um minuto antes do início do ensaio, por forma a que todo o óleo possa ser escoado pelas paredes. Neste caso é importante a viscosidade do óleo, porque quanto esta menor for, melhores valores serão obtidos nos ensaios pois menos óleo ficará agarrado às paredes que vão conter o gás a ser medido. O peso da campânula é contrabalançado por contrapesos de maneira a que possa ser erguido e baixado com uma pequena diferença de pressão (aproximadamente 0,3 kPa), por forma a

conseguir recolher e medir o volume de gás desejado. A correção à impulsão é feita com pesos e é proporcional à massa volúmica do óleo e do metal.

Neste tipo de equipamentos pode-se medir a quantidade de gás que entra ou que sai de um contador sendo que a pressão interna pode variar entre 1,5 kPa e 2,0 kPa [13].



Figura 3.7 – Gasómetro

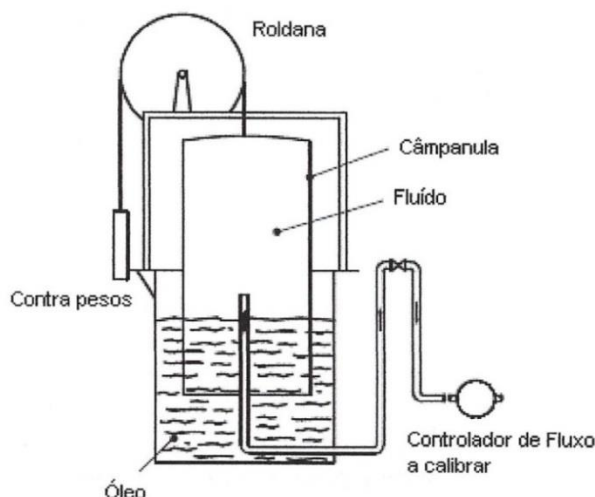


Figura 3.8 – Esquema do Gasómetro

➤ ***Piston prover:***

O *piston prover* apresentado na Figura 3.9 e na Figura 3.10, por sua vez, é um equipamento usado para medir caudais que possam variar entre 0,05 L/min e 30 L/min. Permite também calibrar controladores de fluxo ou caudalímetros de baixo caudal através de um processo dinâmico. Assim, é o equipamento mais apropriado para ser usado como padrão devido aos baixos caudais utilizados nos ensaios deste trabalho (até 12 L/min).

Este equipamento é utilizado para recolher uma determinada quantidade conhecida de gás (volume), a uma determinada temperatura e pressão no interior da câmara (cilindro), durante um intervalo de tempo que também é necessário medir. Ao contrário do Gasómetro, não necessita de óleo que provoca variações no volume, e não é necessário fazer correções à impulsão. Por sua vez, este tipo de equipamento deve trabalhar em locais de pressão e temperatura ambiente constante, por forma a evitar variações de pressão e temperatura no interior do cilindro. No *piston prover*, o fornecimento de gás é feito através de uma rede de ar comprimido ou por uma garrafa de gás de azoto necessário ao processo de calibração.

O interior do *piston prover* é constituído por um corpo cilíndrico metálico ou em vidro, dentro do qual um êmbolo ou pistão percorre todo o seu volume. No ponto mais baixo do cilindro existe um sensor que deteta a passagem do pistão e determina o início da contagem do tempo de subida. Por sua vez, no ponto mais alto do cilindro existe um outro sensor que ao detetar a passagem do pistão, determina o fim da contagem do tempo. A distância percorrida pelo pistão entre o sensor de início e o sensor do fim da contagem é o curso máximo [13].



Figura 3.9 – *Piston prover*

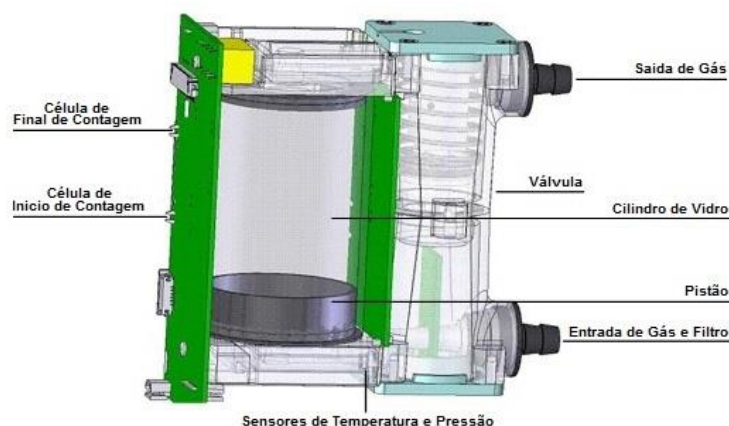


Figura 3.10 – *Piston prover em detalhe*

3.2.1.2 – Controlador de caudal ou medidor de caudal de Gás (Caudalímetro)

Um controlador de caudal ou medidor de caudal de gás, também conhecido como caudalímetro, é um dispositivo que mede a quantidade de fluxo de um fluido que passa através de um tubo por unidade de tempo. É um equipamento um pouco diferente dos contadores de caudal de gás, pois este mede o caudal que por ele passa em tempo real (caudal instantâneo).

Estes aparelhos devem ser colocados em linha com a tubagem que transporta o fluido e podem ser divididos em caudalímetros de massa, que medem a quantidade de massa que é escoada através do dispositivo por unidade de tempo (Ex: kg/s.), e caudalímetros volumétricos que medem o volume de fluido escoado por unidade de tempo (Ex: L/s.).

Existem vários tipos de caudalímetros, de acordo com o princípio de funcionamento de cada um, sendo de destacar os seguintes:

- Caudalímetros de área variável (Mecânicos visuais)

Os caudalímetros de área variável (Figura 3.11, Figura 3.12 e Figura 3.13) são constituídos por um cone invertido e transparente colocado na vertical. O fluido ao circular no interior do cone, impulsiona uma esfera que se encontra no seu interior no sentido ascendente sendo que quanto maior for o caudal, mais sobe a esfera.

Normalmente este tipo de caudalímetros é usado para medir gases em locais onde é necessário conhecer o caudal com pouca precisão. Podem ser encontrados em hospitais para o fornecimento de oxigénio a pacientes ou para medir a capacidade pulmonar de uma pessoa.



Figura 3.11 – Caudalímetro de área variável



Figura 3.12 – Diferentes tipos de caudalímetros de área variável



Figura 3.13 – Desenho esquemático de um caudalímetro de área variável

- Caudalímetros de hélice

São constituídos, no seu interior, por uma hélice com lâminas transversais ao caudal de fluido. A passagem de fluido faz rodar a hélice, cujo eixo faz mover um contador que acumula as leituras. Um exemplo deste tipo de caudalímetros (Figura 3.14 e Figura 3.15) são os contadores de água que existem nas habitações ou os antigos contadores de gás natural.



Figura 3.14 – Caudalímetro de hélice



Figura 3.15 – Desenho esquemático de um caudalímetro de hélice

- Caudalímetros de turbina

São caudalímetros (Figura 3.16, Figura 3.17 e Figura 3.18) constituídos por uma turbina posicionada contra o fluxo de gás, que roda proporcionalmente com o caudal que atravessa o caudalímetro. A turbina, fabricada por um composto de resina e um pó metálico, gera um campo magnético que é lido e codificado por um sensor através do efeito de Hall.



Figura 3.16 – Caudalímetro de turbina



Figura 3.17 – Pormenor das pás da turbina num caudalímetro de turbina



Figura 3.18 – Desenho esquemático de um caudalímetro de turbina

- Caudalímetros que medem a diferença de pressão:

Este tipo de caudalímetros (Figura 3.19 e Figura 3.20) é o mais comum. O fluido é obrigado a circular no interior de um tubo de *Venturi* que tem redução de diâmetro ao longo do tubo. Existem outras variantes, mas são todas baseadas na diferença da leitura de pressão antes e depois do estreitamento do tubo.



Figura 3.19 – Caudalímetro digital de diferença de pressão

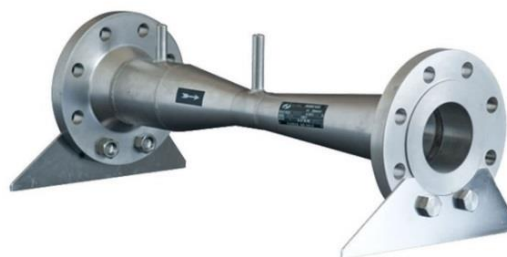


Figura 3.20 – Caudalímetro de diferença de pressão

- Caudalímetros que medem a diferença de temperatura

Estes caudalímetros (Figura 3.21, Figura 3.22 e Figura 3.23) são, grosso modo, constituídos por dois sensores de temperatura e por uma pequena resistência elétrica. Se ambos os sensores lerem a mesma temperatura, isto significa que o fluido não está a circular. Contudo, ao fazer passar um determinado caudal, um dos sensores lê a temperatura inicial do fluido, enquanto que o outro sensor lê a temperatura do fluido aquecido depois de este passar pela resistência. Este sistema, para além de ler o caudal, consegue identificar também a direção em que o fluido está a circular.

A vantagem deste tipo de caudalímetros resume-se ao facto de os mesmos permitirem saber a quantidade de massa do fluido que circula, sendo que as variações de pressão existentes pouco afetam a medição.



Figura 3.21 – Caudalímetro industrial de diferença de temperatura



Figura 3.22 – Caudalímetro de laboratório de diferença de temperatura



Figura 3.23 – Esquema do interior de um caudalímetro de diferença de temperatura

- Caudalímetros magnéticos:

Este tipo de caudalímetros (Figura 3.24 e Figura 3.25), baseiam o seu funcionamento na força de Lorentz, sendo constituídos por fluidos que se deslocam dentro de um campo magnético, sendo que a diferença de potencial (d.d.p.) induzida pela passagem do fluido que se move transversal a um campo magnético é proporcional à velocidade do mesmo, ou seja, é um equipamento que aplica um campo magnético no tubo e mede a diferença de potencial gerada, relacionando-a com o caudal de líquido que passa no caudalímetro.

Este sistema só funciona com líquidos que tenham alguma condutividade elétrica, sendo de muito baixa manutenção, uma vez que não tem partes móveis.



Figura 3.24 – Caudalímetro magnético

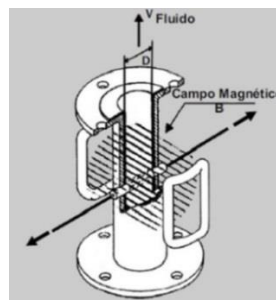


Figura 3.25 – Desenho esquemático de um caudalímetro magnético

- Caudalímetros ultra-sônicos:

É possível encontrar dois tipos de caudalímetros ultra-sônicos (Figura 3.26, Figura 3.27 e Figura 3.28) de acordo com o princípio de medição: ultra-sônicos de efeito de Doppler e ultra-sônicos de tempo de deslocamento; este último mede a diferença de tempo de propagação de uma onda acústica impulsionada, emitida alternadamente por cada uma das sondas montadas no tubo. Se houver circulação do fluido, os tempos serão diferentes. Estes caudalímetros são mais precisos que os ultra-sônicos de efeito Doppler, mas para se obterem leituras é necessário que os fluidos tenham uma baixa percentagem de impurezas; por conseguinte, os de efeito de Doppler são mais úteis e obtêm sinais muito bons, uma vez que o seu princípio de funcionamento é baseado na mudança de frequência do sinal refletido sobre um elemento que se move com o fluido.



Figura 3.26– Caudalímetro ultra-sônico



Figura 3.27 – Aplicação de um caudalímetro ultra-sônico

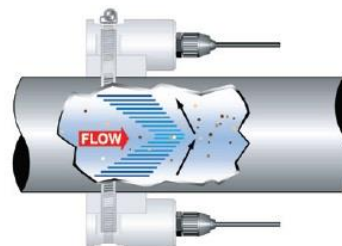


Figura 3.28 – Desenho esquemático de um caudalímetro ultra-sônico

- Caudalímetros de Vórtice:

Este tipo de caudalímetros (Figura 3.29 e Figura 3.30) baseia-se no princípio de geração de vórtices. Um corpo ao atravessar um fluido gera vórtices, sendo que estes são formados alternadamente de um lado para o outro causando diferenças de pressão. São equipamentos de baixa manutenção e boa precisão.



Figura 3.29 – Caudalímetro de vórtice



Figura 3.30 – Desenho esquemático de um caudalímetro de vórtice

- Caudalímetros de Coriolis

Estes caudalímetros (Figura 3.31, Figura 3.32 e Figura 3.33) baseiam-se no princípio de Coriolis, ou seja, no princípio das forças de inércia geradas quando uma partícula num corpo em rotação se aproxima ou afasta do centro da rotação.



Figura 3.31 – Caudalímetro de Coriolis



Figura 3.32 – Caudalímetro de Coriolis de laboratório

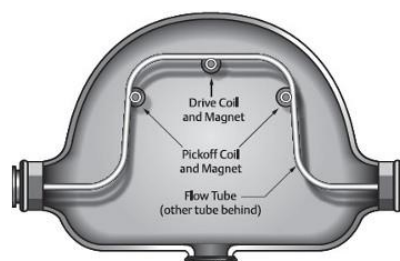


Figura 3.33 – Desenho esquemático de um caudalímetro de Coriolis

3.2.2 – Calibração de Caudalímetros

Tal como os equipamentos volumétricos, também os equipamentos de medição de caudal de gás ou controladores de fluxo de gás, ou de uma forma mais simples, caudalímetros, devem ser calibrados por entidades competentes através de métodos e padrões adequados. Mais uma vez, é de grande importância a sua calibração, por forma a que se compreenda quais os erros sistemáticos do processo de medição, de maneira a que seja possível corrigir e minimizar o erro associado.

A calibração destes é feita através de uma fonte ou gerador de fluido que emite um determinado caudal (fonte de gás comprimido ou compressor de ar) em condições controladas e monitorizadas, e um conjunto de instrumentos devidamente apropriados para a recolha de dados.

O processo de calibração de caudalímetros consiste na medição do volume de fluido escoado (método volumétrico) durante um determinado intervalo de tempo, a uma determinada pressão e temperatura, quando este é colocado em linha com o padrão por forma a comparar os valores obtidos com as leituras de caudal medidas pelo padrão utilizado para tal efeito.

De uma forma geral, os métodos de calibração de controladores de fluxo de gás têm analogias entre si, dos métodos utilizados para controladores de líquidos. A principal diferença reside na compressibilidade do gás e o facto de o gás ter que estar contido num reservatório fechado e controlado [12].

3.3 – Sistema escolhido para medição de caudal de gás

O objetivo principal da dissertação, como referido anteriormente, foi a escolha e implementação de um sistema de calibração de caudalímetros de gás, assegurando a respetiva rastreabilidade ao Sistema Internacional, que permita medir valores constantes de caudal compreendido entre 1 L/min e 12 L/min, com o objetivo de ser usado como padrão para calibração de caudalímetros.

3.3.1 – Padrão

O padrão utilizado tem por base o princípio da medição volumétrica (método volumétrico) que consiste na medição de volume de gás deslocado num determinado intervalo de tempo para as condições de pressão e temperatura medidas no interior da câmara de gás, de maneira a ser possível determinar o caudal volúmico que passa pelo padrão.

Depois de uma escolha cuidadosa dos vários elementos necessários para a constituição do padrão de laboratório, e tendo em conta os caudais relativamente baixos a medir, foi escolhido um *piston prover* para medição de caudal. Desta forma, decidiu-se que o padrão teria que ser constituído por seis elementos:

- Gerador de caudal de azoto (garrafa)
- Mano-redutor, para verificar a pressão na tubagem
- Conjunto de tubagem em *teflon* de ¼"
- *Piston prover* (*Brooks Vol-U-Meter Model 1068*)
- Adaptadores para controlo de caudal de gás à saída do *piston prover*
- *Software* de aquisição de dados em linguagem *Labview*

3.3.1.1 – Gerador de Caudal

O gerador de caudal é constituído por uma garrafa de azoto (Figura 3.34 e Figura 3.35), com um mano-redutor (Figura 3.36), o qual é utilizado para verificar a pressão na tubagem, controlar a abertura das válvulas e permitir a obtenção de um caudal contínuo.



Figura 3.34 – Garrafa de azoto

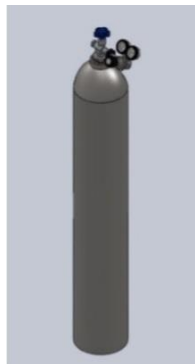


Figura 3.35 – Garrafa de azoto em Solidworks



Figura 3.36 – Mano-redutor e torneira montados na garrafa de azoto

O fluido escolhido para este projeto foi o azoto ou nitrogénio, o qual é o principal componente da atmosfera terrestre, constituindo cerca de 78 % do volume do ar atmosférico, sendo o quinto elemento mais abundante no Universo. Em condições de pressão e temperatura normais, o azoto encontra-se no estado gasoso e é um gás inerte, ou seja, não reage quimicamente com outras substâncias e é incolor, inodoro e insípido.

3.3.1.2 - Piston Prover

O *piston prover* Vol-U-Meter Model 1068 (Figura 3.37, Figura 3.38) usado no desenvolvimento deste projeto, da marca *Brooks*, foi desenhado especificamente para a medição de pequenos volumes e caudais inferiores a 12 L/min, valor máximo que irá ser usado na calibração de caudalímetros durante a presente dissertação.

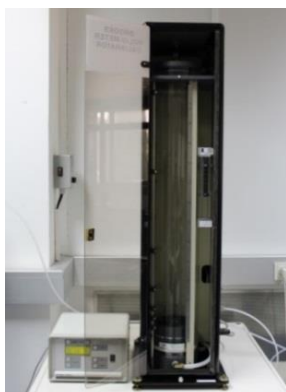


Figura 3.37 – Piston prover Brooks Vol-U-Meter

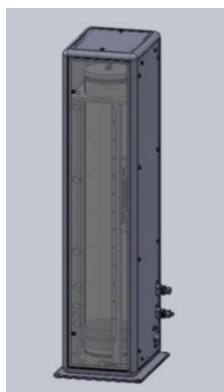


Figura 3.38 – Piston prover Brooks Vol-U-Meter em Solidworks

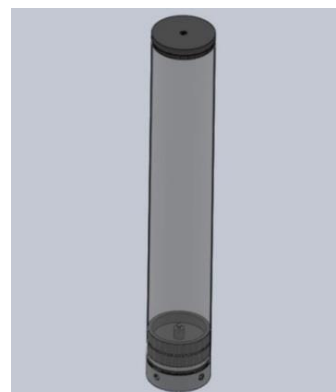


Figura 3.39 – Cilindro do piston prover Brooks Vol-U-Meter em Solidworks

A admissão do volume de gás é feita por um êmbolo que se move num cilindro de vidro (boro silicato) (Figura 3.39), e no qual se encontram instalados sensores foto-elétricos que determinam a temperatura e altura a que o êmbolo se encontra. Paralelamente, entre o êmbolo e o cilindro de vidro existe um vedante de mercúrio (*o-ring*) que visa minimizar o atrito ocorrido durante o movimento do êmbolo (Figura 3.40), de maneira a que se consigam valores com um menor erro associado.

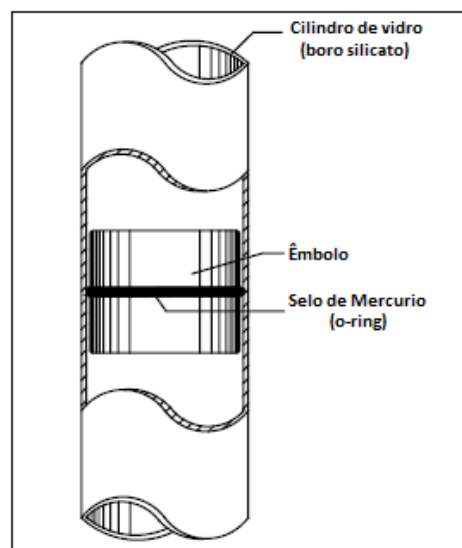


Figura 3.40 – Interior do cilindro do *piston prover*

Resumidamente, pode-se dizer que a rastreabilidade do volume do *piston prover* é baseada em medições do diâmetro interior do tubo de vidro e da posição do êmbolo pelos sensores fotoelétricos, os quais estão montados ao longo do cilindro de vidro.

Desta forma, a unidade de leitura informa o utilizador da quantidade de gás escoado, do tempo que o mesmo demorou a ser escoado e das temperaturas medidas durante o escoamento em cada ponto específico do cilindro de vidro aonde os sensores estão colocados [14].

3.3.1.3 - Adaptador de controlo de caudal à saída do *piston prover*

Para a obtenção de pequenos caudais de gás, variáveis entre 1 L/min e 2 L/min, é necessário a utilização de um adaptador para controlo do caudal de gás na válvula de saída (*outlet*) do *piston prover* com uma abertura de 2,5 milímetros de diâmetro, apresentado na Figura 3.42, de modo a possibilitar um melhor controlo da pressão no interior do aparelho. Esta válvula vai limitar a pressão no interior do cilindro e permitir que os valores do caudal medido sejam constantes, com menor dispersão de valores.



Figura 3.41 – Adaptador para controlo de caudal de gás

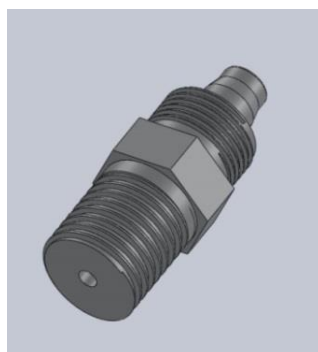


Figura 3.42 – Adaptador de 2,5 mm para controlo de caudal de gás em *Solidworks*



Figura 3.43 – Adaptador de 5 mm para controlo de caudal de gás em *Solidworks*

Por sua vez, para valores de caudal superiores, entre os 2 L/min e os 12 L/min, convém usar um adaptador com uma abertura maior, de 5 milímetros de diâmetro, apresentado na Figura 3.43, com o qual se consegue fazer um controlo da pressão mínima e máxima debaixo do êmbolo do *piston prover*. Deste modo, consegue-se garantir que os valores medidos sejam constantes e com um erro baixo associado.

3.3.1.4 - Aquisição de dados

A aquisição de dados do *piston prover* pode ser feita de duas maneiras: manualmente, através da leitura dos dados retirados pela unidade de leitura do *piston prover*, ou automaticamente, através da ligação da unidade de leitura do *piston prover* a um computador, com recurso a um programa computacional programado em *Labview*.

O registo de dados é feito quando o pistão passa por cada um dos sete sensores foto-elétricos, sendo que o primeiro sensor inicia a contagem do tempo de enchimento e os restantes informam o tempo que o pistão demorou a atingir o respetivo volume de gás e a temperatura a que este se encontra.

3.3.2 – Caudalímetro

Para se poder avançar com o estudo de um padrão que pudesse calibrar caudalímetros de gás, foi necessário adquirir um caudalímetro que satisfizesse as necessidades requeridas. Assim, depois de alguma investigação das opções disponíveis no mercado, foi escolhido um caudalímetro que conseguisse fazer leituras de caudal até 12 L/min, com uma boa exatidão, baixa incerteza e excelente repetibilidade.

O caudalímetro *Bronkshorst*, modelo *El-Flow F-201CV*, apresentado na Figura 3.44 e na Figura 3.45, foi o equipamento escolhido como caudalímetro de testes por ser um controlador/medidor térmico de fluxo de gás, de construção modular, com dimensões bastante reduzidas e adequadas à sua utilização em ambiente de laboratório, capaz de medir e controlar caudais de gás de 0,1 L/min a 15 L/min. Este caudalímetro foi também escolhido, por ser um equipamento com alta precisão, resposta rápida (até 500 ms), excelente repetibilidade e por poder trabalhar com vários tipos de gás, desde que não corrosivos, adaptando-se automaticamente de acordo com as propriedades de cada um.

Por ser um equipamento que consegue fazer medições de caudal com boa exatidão e numa vasta gama de caudais, é usado em diversos ramos da indústria, nomeadamente para monitorização de caudais de gás na indústria alimentar, química e petroquímica, na medição do consumo de gás, no fabrico de semicondutores, ou em fábricas e oficinas que fazem pintura e trabalhos de tratamento de superfícies.



**Figura 3.44 – Caudalímetro Bronkhorst
El Flow F-201 CV**

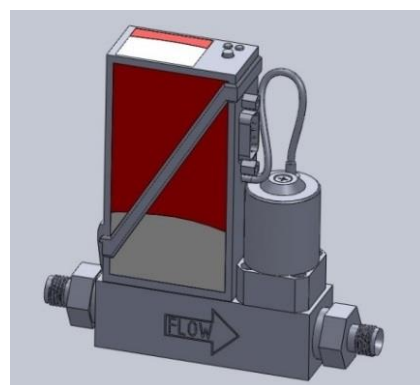


Figura 3.45 – Caudalímetro Bronkhorst El Flow F-201 CV em Solidworks

Estes caudalímetros, que seguem o princípio de funcionamento da diferença de temperatura (Figura 3.46), são constituídos por um tubo capilar, em aço inoxidável, com sensores e uma resistência térmica, em que uma parte do gás é escoado através do tubo capilar, que ao passar pelo sensor é aquecido. Deste modo, as temperaturas T_1 e T_2 medidas vão ser diferentes, sendo que essa diferença é diretamente proporcional ao caudal de gás que está a ser escoado [15].

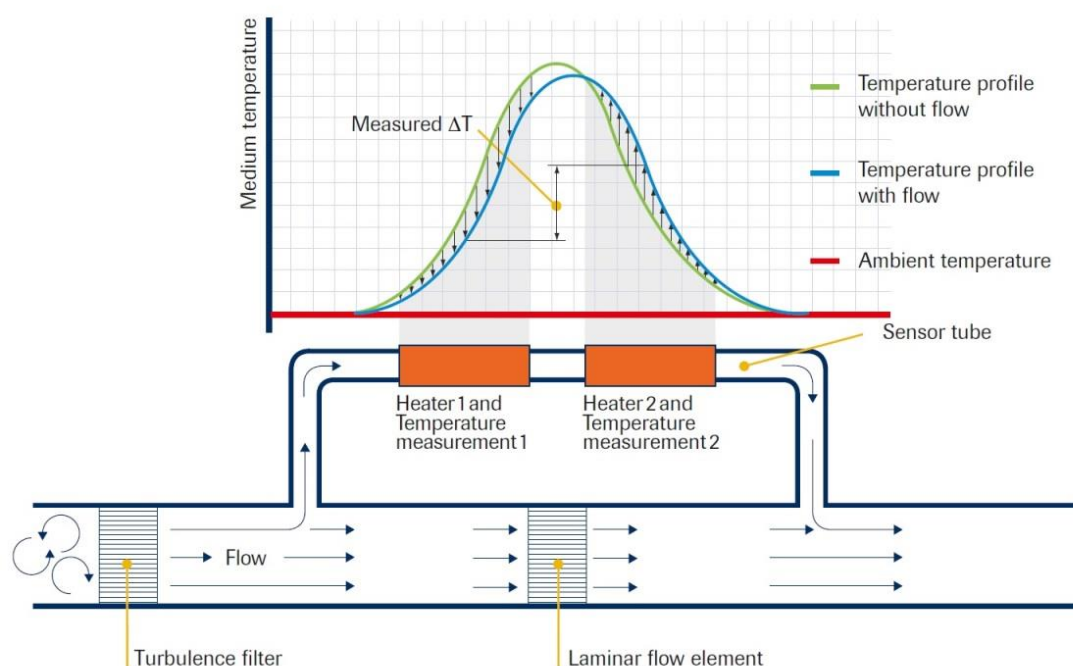


Figura 3.46 – Princípio de funcionamento dos caudalímetros de diferença de temperatura

O caudalímetro adquirido para a elaboração desta dissertação foi calibrado pelo seu fabricante utilizando o mesmo método estudado e discutido nesta dissertação, ou seja, através de um *piston prover*, possuindo um certificado de calibração que apresenta erros e incertezas bastante baixos.

Desta forma, é importante comparar os resultados finais obtidos pelo *piston prover* que se quer utilizar como padrão com os resultados da calibração de fábrica do caudalímetro por forma a saber se o *piston prover* consegue fazer o mesmo tipo de leituras com erros baixos, ou se o mesmo precisa de ser devidamente calibrado, de maneira a permitir a rastreabilidade das medições a padrões nacionais e internacionais.

Capítulo 4 – Cálculo de Incertezas

Uma medição, qualquer que seja o nível de rigor com que é executada, deve conduzir a um valor e a uma medida do rigor com que foi efetuada. Daí se afirmar, de acordo com a terminologia internacional consagrada, que a toda a medição, está associada uma determinada incerteza. Medição é então o conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza e incerteza o parâmetro associado ao resultado da medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensuranda. Esta variabilidade do valor a obter na medição provém de inúmeros fatores, sejam eles do próprio equipamento utilizado, do meio envolvente, do operador ou de outras fontes externas [16].

Com o objetivo de avaliar e expressar a incerteza de medição associada a qualquer medição, foi concebido o GUM – *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement* [17], procedimento que permite a caracterização da qualidade de um resultado numa medição. Este estabelece regras gerais para a avaliação e expressão da incerteza na medição, que podem ser seguidas na maioria dos domínios das medições físicas [17]. Sem tais regras ou indicações, os resultados das medições não poderiam ser comparados entre si ou com os valores de referência dados numa especificação ou padrão. Assim, o aparecimento deste guia trouxe um consenso universal sobre a avaliação e expressão da incerteza de medição, permitindo um vasto espectro na medição de resultados em áreas como o comércio, a engenharia e a ciência [17].

A base do GUM é a recomendação 1 (CI-1981) do Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), e a recomendação INC-1 (1980) do grupo de trabalho sobre a declaração de incertezas [17]. Este foi elaborado por um grupo de trabalho composto por peritos nomeados pelo *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), da Organização Internacional de Padronização (ISO) e da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML). Para além destas, participaram ainda na elaboração deste guia a Federação Internacional da Química Clínica (IFCC), a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) e a União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP) [17].

Por sua vez, quando se efetuam trabalhos experimentais é previsível que ocorram erros de medição, o que acaba por impossibilitar obter-se uma medida de valor igual ao valor real [18]. Estes erros podem ser sistemáticos ou aleatórios, sendo os primeiros os que influenciam qualquer uma das medidas no mesmo sentido, seja acima ou abaixo do valor real, como é o caso da má calibração de um aparelho de medição. Erros aleatórios são erros associados à dispersão de medidas em torno do valor real e, uma vez que não são controláveis, podem ser excluídos, podendo ser compensados através de tratamento de dados [18].

Numa medição, o valor medido não é o valor verdadeiro da grandeza, mas sim um valor aproximado, uma vez que o valor verdadeiro só seria possível obter no caso de uma medição perfeita. Assim, à diferença entre o valor medido (VM) e o valor verdadeiro da grandeza ou valor de referência (VR), dá-se o nome de erro, de acordo com: $\varepsilon = VM - VR$. A indicação do resultado de uma medição só fica completo quando é indicado o valor medido, a incerteza associada a essa medição e as correspondentes unidades [18].

4.1 – Incerteza de Medição

A incerteza é uma propriedade que deve acompanhar intrinsecamente toda a medição, seja no ato da realização de uma calibração, de um ensaio, ou na definição de uma tolerância. O seu significado tem que ser entendido, quando se tem de validar, ajuizar ou simplesmente compreender qualquer dos documentos onde esteja atestada, ou ainda, seja referida numa norma, especificação ou simples folheto [16].

A incerteza de medição é o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda (grandeza que se pretende medir) com base nas informações utilizadas. A incerteza é caracterizada pela dispersão de valores, que podem ser atribuídos à grandeza submetida à medição. O valor medido apresenta maior credibilidade científica quanto menor for o valor da incerteza [8].

Existem dois parâmetros que são habitualmente utilizados para exprimir uma incerteza: um intervalo e um nível de confiança. Assim, ao afirmar-se que na calibração de um determinado caudalímetro de 1 L/min foi calculada uma incerteza de 0,002 L/min para um intervalo de confiança de 95 %, está-se a afirmar que aquele caudal terá um valor entre 0,998 L/min e 1,002 L/min com 95 % de probabilidade de que isso ocorra.

Para avaliar e exprimir a incerteza de uma medição, por norma segue-se a metodologia do GUM [17], que enuncia os seguintes passos:

- Exprimir em termos matemáticos a dependência da mensurada y , em relação às grandezas de entrada x_i ;
- Listar todos os componentes de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza em A ou B;
- Calcular a incerteza-padrão para cada componente de incerteza;
- Calcular os respetivos coeficientes de sensibilidade;
- Avaliar a necessidade de cálculo de covariâncias;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o fator de expansão k ;

- Determinar a incerteza expandida.

Numa calibração, por norma, trabalha-se apenas com uma mensuranda ou grandeza de saída y , que depende sempre de um determinado número de grandezas de entrada x_i ($i=1,2,\dots,N$) de acordo com: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

4.2 – Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandezas de Entrada

Os tipos de Incerteza de Medição, quaisquer que sejam as situações, podem ser classificados em dois tipos: Tipo A ou Tipo B. Por norma, ambos estão presentes em todas as situações.

Os de Tipo A são avaliados mediante tratamento estatístico, o que pressupõe a repetição das medições; por sua vez os de Tipo B são avaliados com base em informação prévia, seja proveniente do fabricante, de publicações especializadas, de cálculos, de certificados de calibração, de experiência anteriormente comprovada, ou apenas de senso comum [16].

O conceito de desvio-padrão é essencial para a determinação da Incerteza, porque todas as contribuições para ela, provenientes das diferentes fontes, têm de ser convertidas num conceito chamado de Incerteza-padrão ($u(x_i)$). Esta corresponde a um intervalo de valores cuja largura é igual ao desvio-padrão [16].

4.2.1 – Avaliação de Tipo A

O método de avaliação de tipo A, pressupõe a avaliação de uma componente de incerteza de medição por meio de uma análise estatística dos valores medidos, obtidos nas condições definidas na medição [8].

Este tipo de avaliação pode ser aplicado quando uma determinada grandeza for medida repetidamente, com um número de observações ($n > 1$) independentes e sob as mesmas condições de medição, obtendo-se a estimativa da grandeza \bar{q} , pela média aritmética das observações q_j ($j=1,2,\dots,n$), através da Equação 12 [17].

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^n q_j$$

Equação 12

A raiz quadrada da variância experimental ($s^2(q)$) é o desvio-padrão experimental $s(q)$, e estima a variância correspondente da distribuição de probabilidades, de acordo com a Equação 13, sendo n o número de observações.

$$s(q) = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \times \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

Equação 13

A incerteza-padrão ($u(x_i)$) da estimativa da grandeza de entrada \bar{q}_i é o desvio-padrão experimental da média, de acordo com a Equação 14:

$$u(x_i) = s(\bar{q})$$

Equação 14

4.2.2 – Avaliação de Tipo B

O método Tipo B de avaliação da incerteza de medição avalia uma componente de incerteza através de outros processos, que não a análise estatística de séries de observações utilizada na avaliação de Tipo A [8].

Deste modo, a incerteza-padrão associada ($u(x_i)$) é avaliada por apreciação científica, baseada na informação disponível sobre a variabilidade possível de x_i , podendo estar incluído para este conjunto de medições vários fatores tais como [17]:

- Dados de medições prévias;
- Dados provenientes de calibração e outros certificados;
- Especificações de fabricantes;
- Incertezas atribuídas a dados de referência obtidos de manuais;
- Experiência ou conhecimento geral do comportamento e das propriedades de materiais e instrumentos relevantes

Neste tipo de avaliação, em que existe menos informação, pode ter que se assumir apenas os valores limite superior e inferior de variação da grandeza e então considerar que o seu valor pertence a uma distribuição normal, triangular ou retangular [16].

As distribuições retangulares são muito frequentes, mas sempre que houver motivos para admitir que os valores médios são mais prováveis, pode-se optar por uma distribuição triangular ou até normal [16].

▪ Distribuição Normal:

Quando a grandeza x_i é retirada de certificados de calibração, especificações de fabricantes ou de outras incertezas, a incerteza-padrão é obtida através da divisão desse valor de incerteza pelo valor do fator de expansão, k como é apresentado pela Equação 15 [17]. Tem-se desta maneira uma distribuição normal.

$$u(x_i) = \frac{\text{incerteza}}{k}$$

Equação 15

Um exemplo de uma distribuição normal é apresentado graficamente na Figura 4.1:

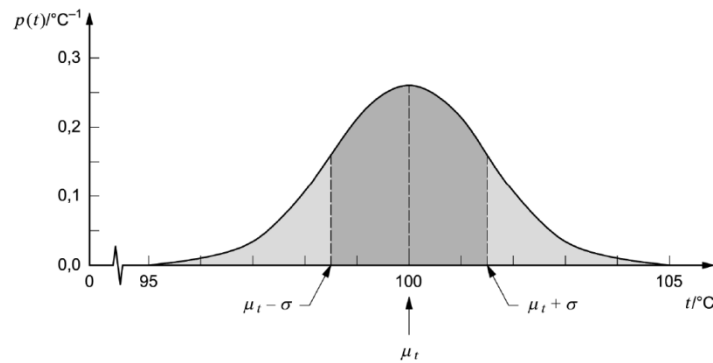


Figura 4.1 – Distribuição Normal [17]

▪ **Distribuição Retangular:**

Caso seja apenas possível estimar os valores dos limites inferior e superior, $(a-)$ e $(a+)$, respectivamente, devido ao não conhecimento específico dos valores de x_i , a incerteza-padrão é obtida através da Equação 16. Neste caso está-se perante uma distribuição retangular [17].

$$u(x_i) = \frac{(a+) - (a-)}{\sqrt{12}}$$

Equação 16

Porém, se a diferença entre os limites for igual a 2, então a incerteza-padrão é dada através da Equação 17.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Equação 17

Um exemplo de uma distribuição retangular é apresentado graficamente na Figura 4.2:

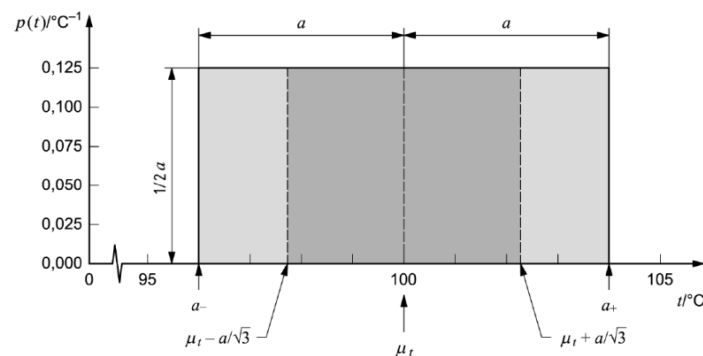


Figura 4.2 – Distribuição Retangular [17]

▪ **Distribuição Triangular:**

Uma distribuição triangular é utilizada quando é conhecido que os valores centrais da grandeza são mais prováveis do que os valores limite, sendo a sua incerteza-padrão definida através da Equação 18 [17].

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Equação 18

Um exemplo de uma distribuição triangular é apresentado graficamente na Figura 4.3:

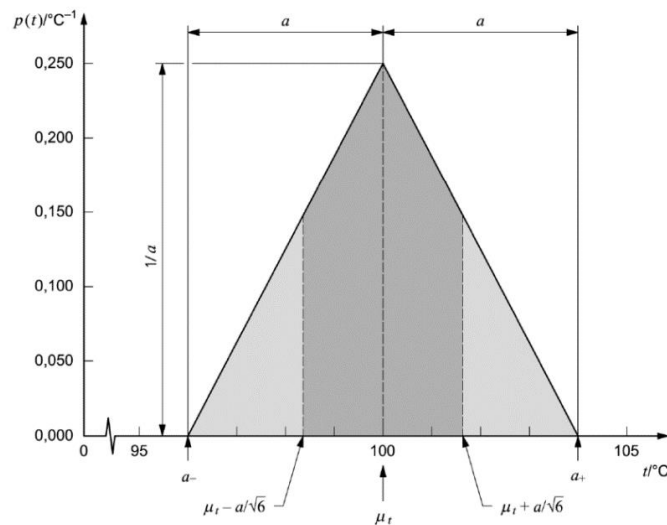


Figura 4.3 – Distribuição Triangular [17]

4.3 – Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída

Quando as grandezas de entrada são independentes, ou seja, não se correlacionam entre si, a incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y , é obtida pela Equação 19, [17]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

Equação 19

A grandeza $u_i(y)$, é a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída y , e por sua vez resulta da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada x_i conforme a Equação 20:

$$u_i(y) = c_i \times u(x_i)$$

Equação 20

Em que c_i é o coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada x_i .

Este coeficiente indica como a estimativa da grandeza de saída y é influenciada pelas variações de cada uma das grandezas de entrada x_i . Por sua vez, pode ser determinado através da derivada parcial da função modelo f em ordem a x_i , como se pode confirmar na Equação 21 [17]:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = c_i \quad \text{Equação 21}$$

Porém, há ainda a hipótese de as grandezas de entrada se correlacionarem entre si. Neste caso, deve-se ter em conta as covariâncias associadas e considerá-las como uma contribuição adicional para a incerteza. Para estes casos, considera-se a lei da propagação da incerteza dada pela Equação 22:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i \cdot c_j \cdot u(x_i, x_j) + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{2} \cdot c_{ij}^2 + c_{ij} \right) \cdot u^2(x_i) \cdot u^2(x_j) \quad \text{Equação 22}$$

Onde $u(x_i, x_j)$ é a covariância estimada associada com x_i e x_j [17].

Ou seja, pode-se definir $u(y)$ como a incerteza combinada das várias incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída. Esta é dada pela combinação das diversas incertezas padrão, de acordo com a lei da propagação da incerteza. Por outras palavras, a incerteza combinada, para uma soma de componentes, é calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de cada Incerteza-padrão dos componentes [19] de acordo com a Equação 23:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad \text{Equação 23}$$

4.4 – Incerteza Expandida

A incerteza de medição associa dois conceitos: um intervalo de valores e um nível de confiança. O intervalo de valores é calculado mediante a combinação das incertezas-padrão das diferentes origens, enquanto que o nível de confiança ou grau de probabilidade é introduzido mediante a multiplicação da incerteza combinada ou Incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída por um fator de expansão k . A este produto, chama-se incerteza expandida U [16] que pode ser vista na Equação 24:

$$U = k \times u(y)$$

Equação 24

Nos casos em que possa ser atribuída à mensuranda uma distribuição normal e a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída seja suficientemente fiável, deve ser usado um fator de expansão igual a 2. Neste caso, estamos num intervalo de confiança de 95 % para a incerteza expandida. No entanto, é possível determinar o fator de expansão adequado através dos seus graus de liberdade efetivos, sendo para tal necessário ter em conta a fiabilidade da incerteza-padrão $u(y)$, da estimativa da grandeza de saída. A determinação dos graus de liberdade efetivos é dada pela fórmula de Welch-Satterthwaite Equação 25 [17].

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i^4(y)}{v_i} \right)}$$

Equação 25

Em que o somatório de $u_i(y)$, são as contribuições para a incerteza-padrão da estimativa de saída y , resultantes das incertezas-padrão das estimativas de entrada x_i .

Para uma dada incerteza-padrão dos valores de entrada $u(\bar{q})$, obtida por uma avaliação de Tipo A, o número de graus de liberdade efetivos é dado por $v_i = n - 1$. No caso de a avaliação ser de Tipo B, torna-se mais complexo estimar os graus de liberdade. Contudo, se por exemplo são definidos limites $a +$ e $a -$, habitualmente escolhidos de forma a que a probabilidade de a grandeza em questão estar fora destes limites seja extremamente pequena, então os graus de liberdade são assumidos como $v_i \rightarrow \infty$ [20].

É possível obter o fator de expansão k , através da Tabela 4.1. Esta é baseada numa distribuição *t-student* para uma probabilidade expandida de 95,45 %. Se o número obtido pela Equação 25 para v_{ef} não for um número inteiro, deve-se optar pelo número inteiro antecedente para v_{ef} [20].

Tabela 4.1 – Fator de expansão k para diferentes n.º de graus de liberdade efetivos

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Quando apresentado o resultado num certificado de calibração, este só está completo quando apresenta a estimativa y da mensuranda e a respetiva incerteza expandida associada U , e deve ser expresso na forma $Y = y \pm U$ [20].

4.5 – Determinação da Incerteza na Medição de Caudal

Para se obter resultados com fiabilidade em qualquer medição, é necessário começar por identificar as fontes de incerteza que influenciam os mesmos de maneira a que seja possível calcular os diferentes tipos de incerteza associados à medição de caudal.

4.5.1 – Fontes de Incerteza que Influenciam a Medição

Existem parâmetros no decorrer de cada ensaio que acabam por influenciar o resultado final de cada medição. Estes parâmetros ou fontes de incerteza, apresentados em seguida, foram tidos em conta durante todo o processo, por forma a garantir um resultado o mais rigoroso possível.

- **Caudal:** O caudal recolhido pelo padrão é dado como uma componente de incerteza através do certificado de calibração. Assim sendo, não é necessário considerar o tempo nem o volume como componentes, uma vez que o caudal é a variação do volume por unidade de tempo.
- **Temperatura do gás utilizado na calibração:** Este parâmetro está diretamente ligado com o fator de correção (K) para o cálculo do caudal final do padrão.
- **Pressão do gás utilizado na calibração:** Este parâmetro, assim como o anterior influencia também o cálculo do fator de correção.
- **Condições ambientais (pressão e temperatura):** A pressão atmosférica e a temperatura ambiente tem ligação com o cálculo do caudal final medido pelo *piston prover*, pois influenciam a temperatura e pressão do gás utilizado na calibração
- **Características do instrumento de medição:** A resolução do instrumento a calibrar tem que ser considerada para o cálculo das incertezas.
- **Repetibilidade do erro:** A repetibilidade do erro é uma incerteza do tipo A, como já referido anteriormente por ser uma repetição das medições.

As fontes de incerteza associadas à calibração de caudalímetros de gás, tal como o tipo de avaliação e distribuição, estão apresentadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Componentes de incerteza associadas à calibração de caudalímetro

Fonte de Incerteza	Incerteza-padrão	Processo de avaliação	Avaliação tipo	Distribuição
Caudal	$u(Q_V)$	Certificado de calibração	B	Normal
Pressão do gás debaixo do êmbolo	$u(P_i)$	Certificado de calibração	B	Normal
Pressão atmosférica	$u(P_n)$	Certificado de calibração	B	Normal
Temperatura do gás debaixo do êmbolo	$u(T_i)$	Certificado de calibração	B	Normal
Temperatura atmosférica (em condições normais)	$u(T_n)$	Certificado de calibração	B	Normal
Resolução do caudalímetro	$u(C)$	Valor do equipamento	B	Retangular
Repetibilidade do erro do caudalímetro	$u(R)$	Variação experimental do erro	A	Normal

4.5.2 – Modelo de Cálculo do Caudal Volúmico

O modelo de cálculo que permite determinar o caudal volúmico de gás nos vários ensaios, ou seja, a quantidade de fluido que atravessa uma determinada área por intervalo de tempo, é apresentado na Equação 26:

$$Q = \frac{1}{t_i} \times \frac{V_n \times 60}{1000} \quad \text{Equação 26}$$

Em que o volume em condições normais (V_n) como se pode constatar na Equação 27 é obtido pelo produto do volume recolhido pelo *piston prover* (V_i) por um fator de correção (K), ou seja:

$$V_n = V_i \times K \quad \text{Equação 27}$$

Em que o fator de correção (K) é dado pela Equação 28:

$$K = \left(\frac{P_i}{P_n} \right) \times \left(\frac{T_n}{T_i} \right) \quad \text{Equação 28}$$

Deste modo, tem-se o modelo de cálculo completo na Equação 29 que permite saber o caudal de gás de cada medição. Na Tabela 4.3 são descritas as grandezas da equação, tal como as respetivas unidades:

Tabela 4.3 – Componentes de incerteza associadas à calibração de caudalímetro

Grandeza	Descrição das grandezas	Unidades
P_i	Pressão total do gás debaixo do êmbolo	(mbar)
P_n	Pressão atmosférica em condições normais	(mbar)
T_i	Temperatura do gás debaixo do êmbolo	(K)
T_n	Temperatura em condições normais	(K)
V_i	Volume recolhido pelo <i>piston prover</i>	(mL)
V_n	Volume em condições normais	(mL)
t_i	Tempo de recolha	(s)
K	Fator de correção para o cálculo do volume em condições normais	(adimensional)
Q	Caudal volúmico	(L/min)

$$Q = \frac{1}{t_i} \times \left[\frac{V_i \times \left(\left(\frac{P_i}{P_n} \right) \times \left(\frac{T_n}{T_i} \right) \right) \times 60}{1000} \right] \quad \text{Equação 29}$$

4.5.3 – Coeficientes de Sensibilidade (Derivadas Parciais)

A relação geral Equação 30 entre a incerteza combinada $u(Q)$ e a incerteza associada a cada componente do balanço de incerteza é uma função do coeficiente de sensibilidade (C_i) Equação 31:

$$U_i(y) = C_i \times u(x_i) \quad \text{Equação 30}$$

em que:

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 31}$$

Ou seja, a cada grandeza representada na Equação 28, corresponde um coeficiente de sensibilidade. Assim, de modo a facilitar os cálculos dos coeficientes de sensibilidade, a Equação 28 foi simplificada, em que o caudal é dado em L/min pela Equação 32:

$$Q = Q_v \times \left[\left(\frac{P_i}{P_n} \right) \times \left(\frac{T_n}{T_i} \right) \right] \quad \text{Equação 32}$$

Considerando novamente a Equação 28 para saber o valor de K, Qv pode ser dado pela Equação 33

$$K = \left[\left(\frac{P_i}{P_n} \right) \times \left(\frac{T_n}{T_i} \right) \right] \quad \text{Equação 28}$$

$$Q_v = \frac{V_i}{t_i} \times \frac{60}{1000} \quad \text{Equação 33}$$

Tem-se para cada uma das variáveis o respetivo coeficiente de sensibilidade dado pelas Equações 34, 35, 36, 37 e 38:

$$\frac{\partial Q}{\partial Q_v} = \frac{P_i}{P_n} \times \frac{T_n}{T_i} \quad \text{Equação 34}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_i} = \frac{Q_v}{P_n} \times \frac{T_n}{T_i} \quad \text{Equação 35}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T_n} = \frac{P_i}{P_n} \times \frac{Q_v}{T_i} \quad \text{Equação 36}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_n} = Q_v \times P_i \times \frac{-1}{P_n^2} \times \frac{T_n}{T_i} \quad \text{Equação 37}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T_i} = Q_v \times T_n \times \frac{P_i}{P_n} \times \frac{-1}{T_i^2} \quad \text{Equação 38}$$

4.5.4 – Incerteza-Padrão

i. Incerteza-padrão associada ao caudal: $u(Q_v)$

A Incerteza-padrão associada ao caudal do *piston prover* (Equação 39) é dada pelo certificado de calibração do mesmo passado pelo VSL, sendo de 0,23 % do caudal.

$$u(Q_v) = 0,23 \% \times Q \quad (L/min) \quad \text{Equação 39}$$

ii. Incerteza-padrão associada à pressão no *piston prover*: $u(P_i)$

A incerteza associada à pressão existente debaixo do êmbolo do *piston prover* (Equação 40), é dada por metade da menor divisão da escala (0,00001 bar) a dividir por raiz de 3 por ser uma distribuição normal, ou seja, a incerteza é de:

$$u(P_i) = \left(\frac{0,00001}{2} \right) / \sqrt{3} \quad (bar) \quad \text{Equação 40}$$

iii. Incerteza-padrão associada à temperatura no *piston prover*: $u(T_i)$

A incerteza associada à temperatura existente debaixo do êmbolo do *piston prover* (Equação 41), é dada pelo quociente da incerteza expandida, obtida no certificado de calibração, com o respetivo fator de expansão (k), sendo de:

$$u(T_i) = \frac{u(T_i)}{k} = \frac{0,05}{2} (^\circ\text{C}) = \frac{0,05}{2} (K) \quad \text{Equação 41}$$

iv. Incerteza-padrão associada a pressão atmosférica: $u(P_n)$

A incerteza associada à pressão atmosférica (Equação 42) é dada pelo quociente da incerteza expandida, obtida no certificado de calibração do barómetro, com o respetivo fator de expansão (k):

$$u(P_n) = \frac{U(P_n)}{k} = \frac{0,02}{2,18} (kPa) = \frac{0,000020}{2.18} (bar) \quad \text{Equação 42}$$

v. Incerteza-padrão associada à temperatura ambiente: $u(T_n)$

A incerteza associada à temperatura ambiente (Equação 43), é dada pelo quociente da incerteza expandida, obtida no certificado de calibração do termómetro, com o respetivo fator de expansão (k):

$$u(T_n) = \frac{U(T_n)}{k} = \frac{0,05}{2} (^\circ\text{C}) = \frac{0,05}{2} (K) \quad \text{Equação 43}$$

vi. Incerteza associada à resolução do caudalímetro: $u(C)$

A incerteza associada à resolução do caudalímetro (Equação 44) é dada por metade da resolução do instrumento a dividir pela raiz de 3, por ser uma distribuição retangular.

$$u(C) = \frac{R/2}{\sqrt{3}} = \frac{(0,01/2)}{\sqrt{3}} \quad (L/min) \quad \text{Equação 44}$$

vii. Incerteza associada à repetibilidade: $u(R)$

A incerteza associada à repetibilidade do caudalímetro (Equação 45) é dada pelo desvio-padrão de cada caudal a dividir pela raiz do número de ensaios, sendo esta uma distribuição normal.

$$u(R) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{(\sigma)}{\sqrt{6}} \quad (L/min) \quad \text{Equação 45}$$

4.5.5 – Incerteza Combinada

Esta incerteza obtém-se combinando as diversas incertezas-padrão que para ela contribuem através da raiz quadrada da soma dos quadrados de cada uma delas.

Neste caso, as incertezas-padrão são dadas pela incerteza do padrão, pela incerteza da resolução do caudalímetro e pela incerteza da repetibilidade do erro.

A incerteza do padrão (*piston prover*) é dada pela Equação 46:

$$u(Q) = \sqrt{\left(u(Q_v) \times \frac{\partial Q}{\partial Q_v}\right)^2 + \left(u(P_i) \times \frac{\partial Q}{\partial P_i}\right)^2 + \left(u(P_n) \times \frac{\partial Q}{\partial P_n}\right)^2 + \left(u(T_i) \times \frac{\partial Q}{\partial T_i}\right)^2 + \left(u(T_n) \times \frac{\partial Q}{\partial T_n}\right)^2}$$

Equação 46

Enquanto que as incertezas associadas à resolução do caudalímetro, e à repetibilidade do caudalímetro, como visto anteriormente são dadas pelas Equações 44 e 45 respetivamente.

Assim, a incerteza combinada para a calibração de caudalímetros de gás é dada pela Equação 47 e/ou pela Equação 48:

$$u_{c \text{ cal}} = \sqrt{[u(Q)]^2 + [u(C)]^2 + [u(R)]^2} \quad \text{Equação 47}$$

⇔

$$u_{c \text{ cal}} = \sqrt{\left(\sqrt{\left(u(Q_v) \times \frac{\partial Q}{\partial Q_v}\right)^2 + \left(u(P_i) \times \frac{\partial Q}{\partial P_i}\right)^2 + \left(u(P_n) \times \frac{\partial Q}{\partial P_n}\right)^2 + \left(u(T_i) \times \frac{\partial Q}{\partial T_i}\right)^2 + \left(u(T_n) \times \frac{\partial Q}{\partial T_n}\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{R/2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)^2}$$

Equação 48

Tabela 4.4 – Componentes de incerteza combinada

$u(Q)$	Incerteza do padrão
$u(C)$	Incerteza da resolução do caudalímetro
$u(R)$	Incerteza da repetibilidade do caudalímetro
r	Resolução do instrumento
σ	Desvio-padrão
n	Número de ensaios

4.5.6 – Incerteza Expandida

A incerteza associada à calibração de material volumétrico é dada pela incerteza expandida, U .

De acordo com o GUM, esta incerteza (Equação 49) é expressa pela incerteza combinada multiplicada pelo fator de expansão k :

$$U = k \times u_{cal} \quad \text{Equação 49}$$

Para calcular k é necessário obter a Incerteza-padrão da mensuranda e estimar o número de graus de liberdade efetivos (V_{ef}) da Incerteza-padrão (Equação 50), calculados a partir da fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{ef} = \frac{u_v^4}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i^4}{v_i} \right)} \quad \text{Equação 50}$$

Em que u_i corresponde a cada uma das N contribuições consideradas para a incerteza e v_i é o número de graus de liberdade efetivos da componente da Incerteza-padrão u_i .

O fator de expansão k é então calculado a partir da inversa da distribuição t de Student para uma probabilidade expandida de 95,45 %.

A Tabela 4.1, como já demonstrada anteriormente na página 44, apresenta alguns valores para o fator de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efetivos v_{ef} .

Capítulo 5 – Procedimento Experimental

A presente dissertação tem como um dos objetivos a elaboração de um procedimento experimental que permita a calibração de caudalímetros de gás através de um *piston prover* apresentado na Figura 5.1. Este tipo de procedimento visa estabelecer técnicas rigorosas para a execução de uma determinada tarefa e de uma forma geral deve conter os seguintes tópicos:

- Padrões de trabalho utilizados;
- Modo operatório, onde são descritas as ações a realizar previamente a uma calibração;
- Lista detalhada de passos a seguir para efetuar a calibração;
- Forma de análise e tratamento de dados.

Para a elaboração do projeto foi necessário conceber e desenhar todo o sistema em CAD. Desta forma, encontram-se neste capítulo e em anexo (Anexo A) todos os padrões e equipamentos utilizados neste projeto.

No capítulo 2 encontram-se algumas definições importantes para a compreensão do procedimento de calibração, nomeadamente os termos caudal volumico, massa volumica, erro de medição, exatidão de medição, incerteza de medição, mensuranda, rastreabilidade, repetibilidade, reprodutibilidade, entre outros.

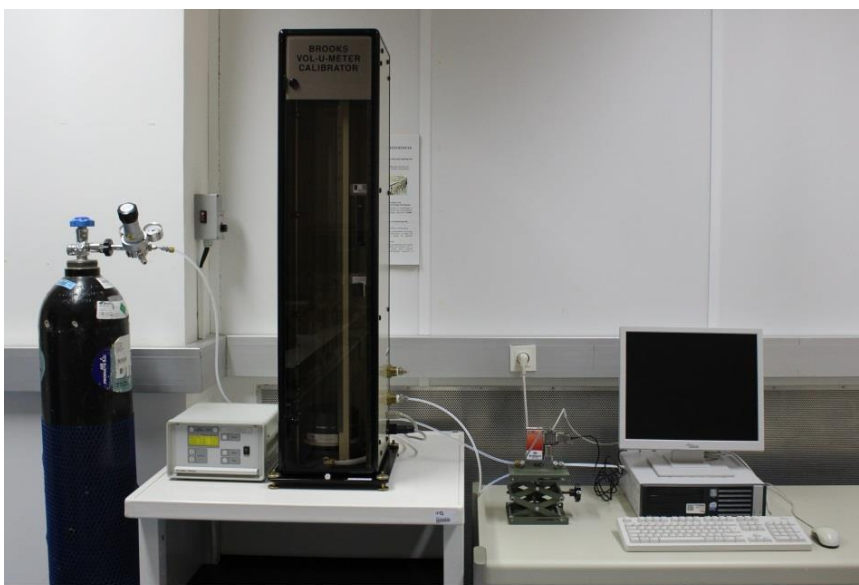


Figura 5.1 – Montagem do Sistema

5.1 – Rastreabilidade

A Figura 5.2 apresenta a cadeia de rastreabilidade seguida numa calibração em volume e caudal volúmico, com os padrões de trabalho identificados na base da cadeia.

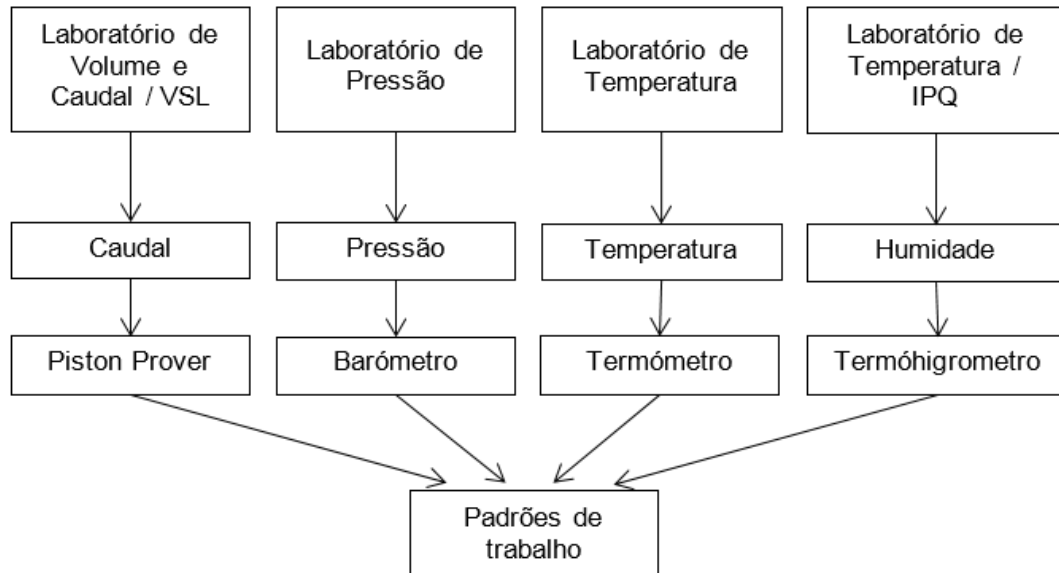


Figura 5.2 – Cadeia de Rastreabilidade

5.2 – Calibração de Caudalímetros de Gás

Neste capítulo é descrito o procedimento de calibração de caudalímetros de gás através da utilização de um padrão primário de medição de caudal à temperatura de 20 °C para um intervalo de medição de 1 L/min a 12 L/min. Tanto o padrão primário como os equipamentos de trabalho foram calibrados seguindo normas e procedimentos técnicos dos laboratórios do IPQ e do VSL.

5.2.1 – Padrões e Equipamentos de Trabalho

5.2.1.1 – Padrões de Trabalho

i) Garrafa de Azoto

Um dos equipamentos constituintes do padrão é o gerador de caudal, apresentado na Figura 5.3 e na Figura 5.4, e que consta no Anexo A com mais detalhe, constituído por uma garrafa de azoto que através de um mano-redutor utilizado para verificar a pressão na garrafa e na tubagem, permite a obtenção de um caudal contínuo.



Figura 5.3 – Garrafa de azoto com mano-redutor

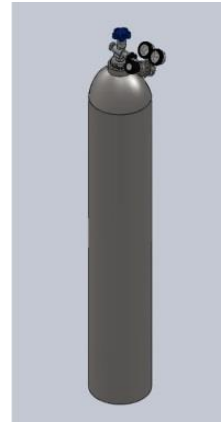


Figura 5.4 – Garrafa de azoto com mano-redutor em Solidworks

ii) *Piston Prover (Brooks Vol-U-Meter - Model 1068)*

O *piston prover* utilizado, apresentado na Figura 5.5 e na Figura 5.6, e que consta no Anexo A, da marca *Brooks (Vol-U-Meter Model 1068)*, foi desenhado especificamente para a medição de pequenos volumes e caudais, nomeadamente caudais inferiores a 12 L/min, e calibração de caudalímetros. Este padrão por sua vez tem que estar devidamente calibrado, de maneira a permitir a rastreabilidade das medições a padrões nacionais e internacionais.



Figura 5.5 – *Piston prover Brooks Vol-U-Meter Model 1068*

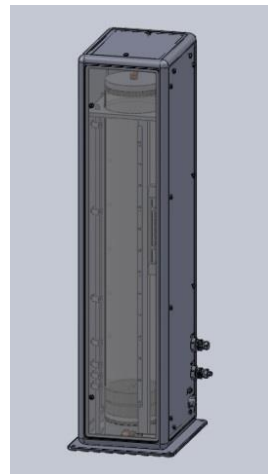


Figura 5.6 – *Piston prover Brooks Vol-U-Meter Model 1068 em Solidworks*

iii) *Adaptador para controlo de caudal de gás*

Durante os ensaios foi necessário o uso de adaptadores para controlo de caudal de gás na válvula de saída (*outlet*) do *piston prover*.

Estes adaptadores foram necessários para controlar o caudal de gás durante todo o processo de calibração, visto que o *piston prover* possui uma válvula automática a montante da válvula de entrada (*inlet*) que permite sempre a saída de algum gás diretamente para a válvula

de saída (outlet) durante todo o processo de funcionamento, por forma a controlar o caudal interno.

Para a obtenção de pequenos caudais de gás, entre 1 L/min e 2 L/min, usa-se um adaptador com uma abertura de 2,5 milímetros de diâmetro de modo a possibilitar um melhor controlo da pressão interna do *piston prover* e assim permitir uma maior fluidez do caudal de gás que passa pelo aparelho.

Por sua vez, para valores de caudal entre 2 L/min e 12 L/min, utiliza-se um outro adaptador, com uma abertura de 5 milímetros de diâmetro, para fazer o mesmo controlo do caudal de gás e garantir mais uma vez um escoamento constante.

Estas válvulas vão limitar a pressão no interior do cilindro e permitir que os valores do caudal medido sejam constantes e com menor dispersão de valores.



Figura 5.7 – Adaptador para controlo de caudal de gás

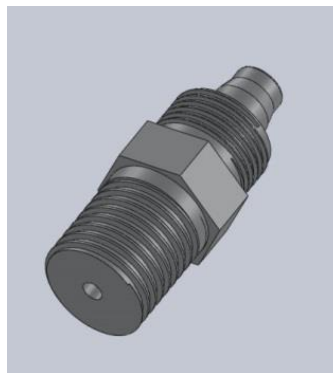


Figura 5.8 – Adaptador para controlo de caudal de gás – 2,5 mm de diâmetro em Solidworks



Figura 5.9 – Adaptador para controlo de caudal de gás – 5 mm de diâmetro em Solidworks

5.2.1.2 – Equipamentos de Trabalho

i) Termómetro

Os termómetros utilizados para a medição da temperatura do ar no laboratório, devem ter uma resolução igual ou superior a 0,01 °C e uma incerteza de medição igual ou inferior a 0,05 °C. Para a medição da temperatura do ar foi utilizado o termo higrómetro AHLBORN Alemo 2590. Todos os termómetros são calibrados pelo Laboratório de Temperatura do IPQ, estando sujeitos aos critérios de aceitação internos do LVC.

ii) Higrómetro

Os Higrómetros utilizados para a medição da humidade do ar no laboratório devem estar devidamente calibrados e possuir uma resolução igual ou inferior a 1 % e incerteza igual ou inferior a 5%. Para a medição da humidade do ar foi utilizado o mesmo termo higrómetro (Ahlborn Almemo 2590) utilizado para a medição da temperatura do ar.

iii) Barómetro

O barómetro utilizado para a medição da pressão atmosférica possui uma resolução de 0,01 kPa e apresenta uma incerteza de medição igual ou inferior a 0,02 hPa.

Este é calibrado pelo Laboratório de Pressão do IPQ, estando sujeito aos critérios de aceitação internos do LVC.

iv) Válvula de controlo e barómetro de medição da pressão de azoto

O sistema de medição e controlo da pressão interna da garrafa é constituído pelos seguintes componentes:

- a) Válvula reguladora da pressão de saída da garrafa (Air Liquide, HBS 315-3)
- b) Indicador de pressão interna da garrafa com resolução de 5 bar (Wikai)
- c) Indicador de pressão de saída do gás (azoto) com resolução de 0,5 bar (Wikai)

Este sistema mede a pressão interna na garrafa de azoto e permite ajustar o caudal de gás desejado à saída.

v) Fluido de Calibração

Para efetuar a calibração de um caudalímetro de gás pode ser utilizado azoto ou ar comprimido como fluido de calibração.

Para este projeto foi escolhido azoto (N_2) comprimido, fornecido através de garrafas devidamente preparadas pelo Laboratório de Gases de Referência do Instituto Português da Qualidade. A sua preparação com pureza a 98 % acaba por ser relativamente fácil e pouco dispendiosa.

Na utilização de azoto em garrafa, teve-se em atenção a pressão utilizada, pois para valores inferiores a 5 bar de pressão na garrafa, o funcionamento do sistema não era adequado o que originava um caudal pouco constante.

5.2.2 – Condições de Referência

Durante a calibração de um caudalímetro ou equipamento de medição de caudal ou volume de gás, as condições ambientais do laboratório devem estar dentro dos seguintes valores:

- Temperatura ambiente – [19 ; 23] °C
- Humidade relativa – [50 ; 70] %
- Pressão atmosférica – [920 ; 1080] hPa

5.2.3 – Modo Operatório

5.2.3.1 – Sistema de aquisição e tratamento de dados

A aquisição de dados para a calibração de caudalímetros é feita através do software *Flow DDE* que permite a ligação e comunicação entre o caudalímetro e o computador, e pela aplicação *Flow Plot* e *Flow View* que fazem a análise, recolha e medição em tempo real do caudal para um ficheiro em formato “.txt”, com um intervalo entre medições de 1/10 segundo. Porém, a recolha de dados do *piston prover* é feita manualmente em seis pontos diferentes do equipamento através da unidade de leitura do mesmo e com intervalos entre medições a variar consoante o caudal de gás que está a ser medido.

Para o tratamento estatístico dos dados recolhidos foi necessário utilizar o *Excel* por forma a conseguir-se fazer o e respetivo cálculo de erros e incertezas associados a cada caudal.

i) Aquisição de Dados

No início de todo o processo deve-se efetuar o registo das condições ambientais no ficheiro de *Excel* no qual vão ser introduzidos os dados da calibração, e fazer a ligação do equipamento, começando pela conexão do computador ao caudalímetro através do software *Flow DDE*, como é apresentado na Figura 5.10:

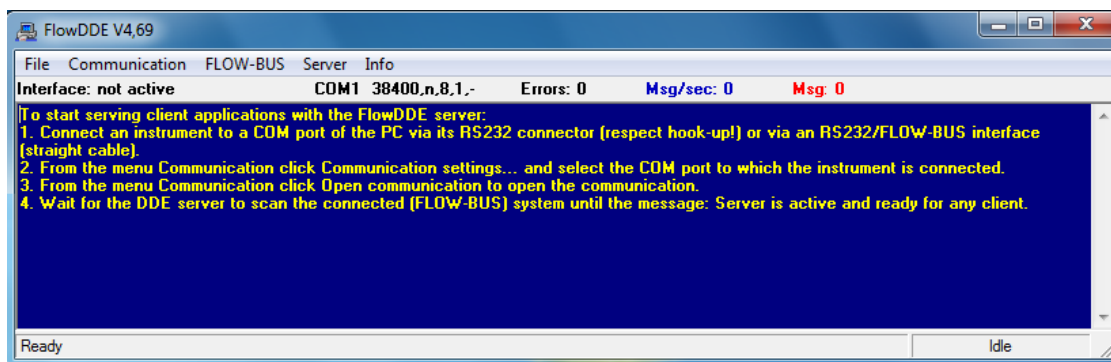


Figura 5.10 – *Flow DDE*

Através do programa *Flow View* apresentado na Figura 5.11 e do programa *Flow Plot* apresentado na Figura 5.12, ambos da Bronkhorst, é possível fazer a aquisição de dados do caudal medido pelo caudalímetro em tempo real. Estes são apresentados na forma gráfica, possibilitando ao operador visualizar o comportamento do escoamento durante todo o processo.

A aquisição de dados é iniciada premindo no botão “START” do programa *Flow Plot*, apresentado na Figura 5.12, e terminada no final da medição, premindo no botão “STOP” no mesmo programa.

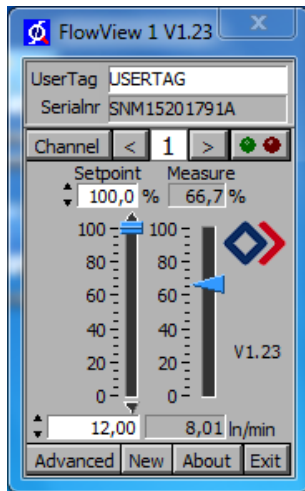


Figura 5.11 – Flow View

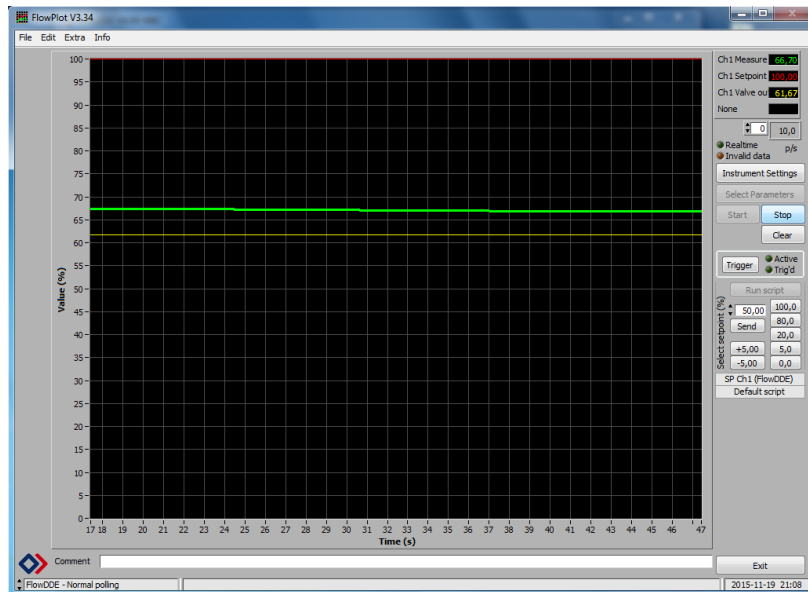


Figura 5.12 – Flow Plot

ii) Tratamento de Dados

O tratamento de dados consiste no registo do caudal e cálculo dos respetivos erros e incertezas através de uma folha de cálculo de *Excel*. Estes cálculos são efetuados através da equação 29 para a determinação do caudal, que por sua vez pode ser expressa de uma forma mais simplificada através da equação 26, e nas equações 49 e 50, respetivamente para o cálculo da incerteza combinada e expandida.

5.2.3.2 – Preparação do sistema

Antes de se iniciar um ensaio é necessário garantir que todo o sistema se encontra apto a medir o caudal de gás desejado e para isso, é necessário haver:

i) Controlo da pressão interna na garrafa de azoto

No início de cada calibração é necessário verificar a pressão interna na garrafa de azoto, de modo a evitar trabalhar com pressões abaixo dos 5 bar, devido a uma perda constante verificada para valores inferiores a essa pressão.

ii) Tempo de espera – Caudalímetro

Antes de se iniciar o primeiro ensaio experimental, é necessário ligar o caudalímetro e esperar pelo menos 30 minutos de maneira a que este estabilize e se obtenha uma boa precisão das leituras feitas no equipamento.

iii) **Adaptador de controlo de caudal de gás à saída**

De acordo com o caudal usado na calibração, deve-se escolher o adaptador adequado como apresentado na Tabela 5.1, de maneira a que se consiga fazer um controlo da pressão mínima e máxima debaixo do êmbolo do *piston prover* para garantir que os valores obtidos sejam constantes e com baixo erro associado.

Tabela 5.1 – Adaptador de controlo de caudal de gás à saída de acordo com cada caudal

Caudal (L/min)	Adaptador de controlo de caudal de gás
1 L/min e 2 L/min	2,5 mm de diâmetro
de 4 L/min a 12 L/min	5 mm de diâmetro

5.2.3.3 – Montagem do sistema

Para uma montagem correta e funcional, o caudalímetro deve estar instalado entre a garrafa de azoto e o *piston prover*, de maneira a que os valores sejam mais fiáveis, tal como é possível observar na Figura 5.13.

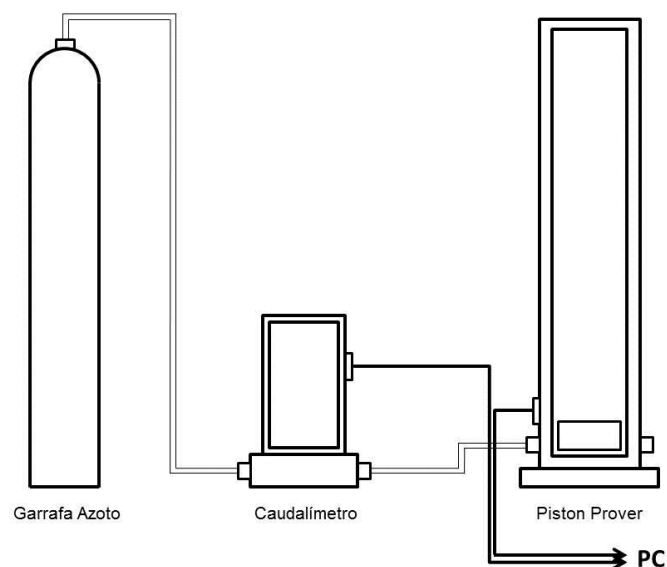


Figura 5.13 – Esquema da montagem do sistema

Com esta montagem é possível saber o caudal de gás que sai da garrafa e está a passar no sistema (padrão + caudalímetro), através da leitura em tempo real do caudal no caudalímetro, pelo programa *Flow View* e assim conseguir-se fazer um ajuste do caudal pretendido antes de se começar a fazer um ensaio.

De outra maneira não seria possível ter uma noção real do caudal exato, uma vez que o *piston prover* só permite o cálculo final do caudal depois de decorrido o ensaio.

5.2.4 – Procedimento Experimental

Para assegurar a estabilidade do sistema, sempre que o equipamento é ligado, deve-se realizar 3 ensaios em branco, ou seja, fazer 3 ensaios a um determinado caudal, mas sem retirar valores dos equipamentos.

Procedimento de Calibração:

- 1) Ligar o Equipamento de Calibração e o Caudalímetro:
 - i) Montar o caudalímetro que se pretende calibrar e posteriormente ligar à corrente, deixando-o aquecer e estabilizar durante cerca de 30 minutos antes de o utilizar (conforme o manual de utilização do mesmo);
 - ii) Ligar o *piston prover* uns minutos antes de utilizar, de maneira a estabilizar;
 - iii) Abrir a torneira de segurança da garrafa de azoto;
 - iv) Ligar o termómetro e o barómetro utilizados durante a calibração;
- 2) Iniciar o software de comunicação e aquisição de dados do caudalímetro (equipamento a ser calibrado):
 - i) Iniciar o programa *Flow DDE* que irá permitir a ligação e a comunicação entre o caudalímetro e o computador; seleccionar “communication”, e de seguida “open communication”;
 - ii) Iniciar o programa *Flow Plot* e o programa *Flow View* que permitem fazer a leitura do caudal no caudalímetro;
- 3) Abrir a folha de cálculo em *Excel* (matriz) e guardar em “Guardar como” com o nome e o número de série do caudalímetro a ser calibrado;
- 4) Verificar as condições ambientais (temperatura e pressão atmosférica) e registar os valores dos parâmetros nos respetivos campos da folha de cálculo do *Excel*;
- 5) Abrir a garrafa de azoto através do mano-redutor até se obter no caudalímetro (programa *Flow View*) um caudal próximo do caudal que se quer medir; deixar estabilizar;

- 6) Carregar no botão “START” no *piston prover* e simultaneamente clicar no botão “START” no programa *Flow Plot*;
- 7) Quando o êmbolo do *piston prover* chegar ao último ponto de leitura, termina o processo de medição do caudal. Nesta altura, há que parar a leitura de caudal do caudalímetro premindo no botão “STOP” no programa *Flow Plot*;
- 8) Fechar a garrafa de azoto;
- 9) Retirar manualmente os dados obtidos na unidade de leitura do *piston prover* para os 6 pontos (tempo de subida do pistão e temperatura interior do gás) e registar na matriz de calibração que é apresentada numa folha de cálculo do *Excel* e que consta no Anexo B;
- 10) Abrir a pasta “Os meus documentos” e abrir o último ficheiro de texto com a extensão “.txt” gravado “*plotdata0000.txt*” como é possível ver na Figura 5.14:

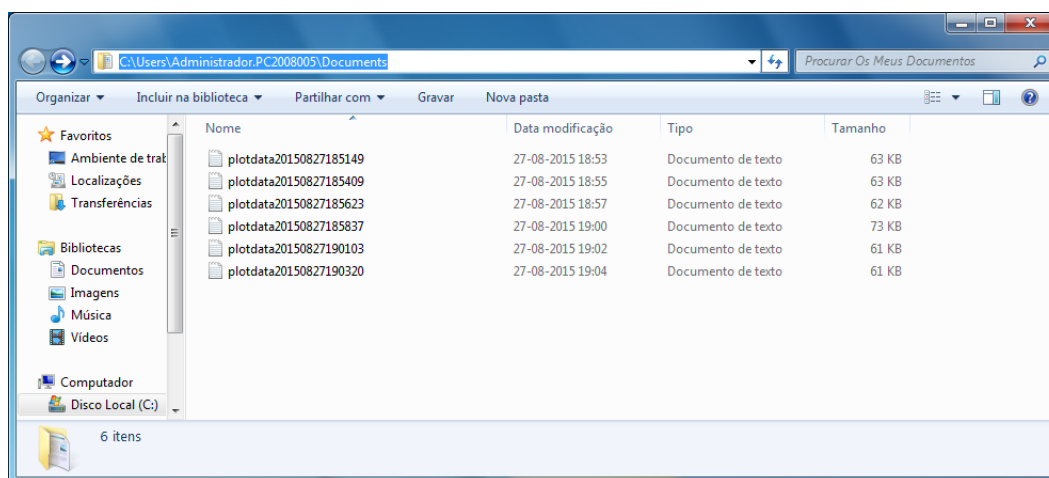


Figura 5.14 – Pasta dos ficheiros do programa *Flow Plot*

- i) Selecionar todos os dados e copiar;
- ii) Abrir uma folha de cálculo de *Excel* em branco;
- iii) Introduzir os dados copiados através das opções de colagem:
 - a) Selecionar “utilizar assistente de importação de texto”;
 - b) No passo 1 de 3 carregar em seguinte;
 - c) No passo 2 de 3 seleccionar em “delimitadores” a opção “ponto e vírgula” e retirar a opção “espaço”, carregando em seguinte no final;

- d) No passo 3 de 3 clicar na opção “avançadas” e escolher o ponto no separador decimal e a vírgula no separador de milhares e por fim carregar em “OK” e “Concluir”;
 - e) Apagar as 4 últimas colunas da direita e deixar os dados referentes às primeiras duas colunas (tempo e caudal);
-
- 11) Inserir os dados anteriores na matriz de calibração, que é apresentada numa folha de cálculo do *Excel*, na área referente aos dados retirados do caudalímetro para o caudal que se está a medir. Esta matriz é apresentada no Anexo B;
 - 12) Gravar os dados recolhidos premindo no botão “*Guardar*” e verificar os valores obtidos de caudal, erros e incertezas;
 - 13) Repetir o mesmo processo para os vários caudais necessários para a calibração correta do caudalímetro.

5.2.5 – Apresentação de resultados

Os resultados de cada calibração são apresentados no certificado de calibração, indicando-se os erros e as respetivas incertezas individuais no intervalo de medição pretendido, assim como qualquer tipo de informação considerada relevante.

Capítulo 6 – Análise e Discussão de Resultados

No presente capítulo são apresentados os vários resultados dos ensaios efetuados durante todo o processo de estudo que permitiram verificar que o sistema é adequado para a calibração de caudalímetros de gás.

O trabalho experimental iniciou-se com testes ao padrão de gás, por forma a avaliar a sua estabilidade durante todo o processo de calibração. Posteriormente, foram feitos vários ensaios que permitiram calcular os erros e as incertezas dos caudais ensaiados, assim como estudar o comportamento do caudalímetro quanto à repetibilidade e à reprodutibilidade.

Após terem sido retiradas conclusões positivas acerca da estabilidade, repetibilidade e reprodutibilidade do sistema, foi possível proceder à elaboração de um procedimento de calibração para caudalímetros de gás, de uma matriz de calibração e do desenho em CAD 3D de todo o sistema utilizado nesta dissertação.

6.1 – Sistema padrão de medição de caudal de gás

Para uma melhor compreensão de como é feita a calibração de um caudalímetro de gás através do método volumétrico, no início do estágio no Instituto Português da Qualidade, foi facultada uma fase de formação com o objetivo de ganhar experiência, sensibilidade e compreensão das normas inerentes ao processo, tal como de todos os cálculos de erros e incertezas necessários para a obtenção de um resultado final.

Numa fase posterior à formação recebida sobre calibração de equipamentos volumétricos, deu-se início aos ensaios de caudal de gás, no sistema padrão utilizado neste trabalho.

6.1.1 – Estabilidade do padrão

Para o sistema padrão em estudo, com um *piston prover* de volume máximo de 12 L, decidiu-se efetuar ensaios para 6 caudais diferentes, por forma a saber se o sistema seria adequado ou não para a calibração de caudalímetros com caudais até 12 L/min.

Foram assim realizados ensaios de caudal ao padrão para 1 L/min, 2 L/min, 4 L/min, 6 L/min, 8 L/min e 12 L/min, os mesmos caudais utilizados nos ensaios de calibração.

De maneira a verificar a estabilidade do padrão com o passar do tempo, foram feitos ensaios nos dias 05 de junho, 26 de agosto, 28 de outubro e 30 de dezembro de 2015.

Por forma a ser possível a representação gráfica das incertezas em cada caudal, e devido ao facto de estas serem de uma ordem de grandeza inferior à dos erros apresentados, foi necessário elaborar um gráfico para cada caudal medido em cada dia.

Os valores numéricos destes ensaios de estabilidade, referentes a todos os caudais analisados para cada dia escolhido de cada um dos 4 meses de testes são apresentados nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4. Porém só são apresentados graficamente os valores referentes aos vários caudais analisados no dia 05 de junho (Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6), estando os restantes gráficos referentes à estabilidade do padrão para os caudais analisados no dia 26 de agosto, 28 de outubro e 30 de dezembro, apresentados no Anexo C.

É ainda de referir, que as incertezas expandidas apresentadas nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, pouco se alteram nos diferentes dias de ensaios, pois são referentes ao padrão utilizado onde os únicos fatores que as podem fazer variar são a pressão da garrafa e a temperatura do interior do cilindro do *piston prover*. Estes, por sua vez pouco se alteraram ao longo dos dias de ensaios o que leva a que a variação das incertezas só seja perceptível se as mesmas forem apresentadas com 4 ou 5 casas decimais; no entanto estas têm que ser apresentadas com apenas 3 casas decimais de maneira a estarem em concordância com os restantes valores e apresentarem no máximo 2 algarismos significativos.

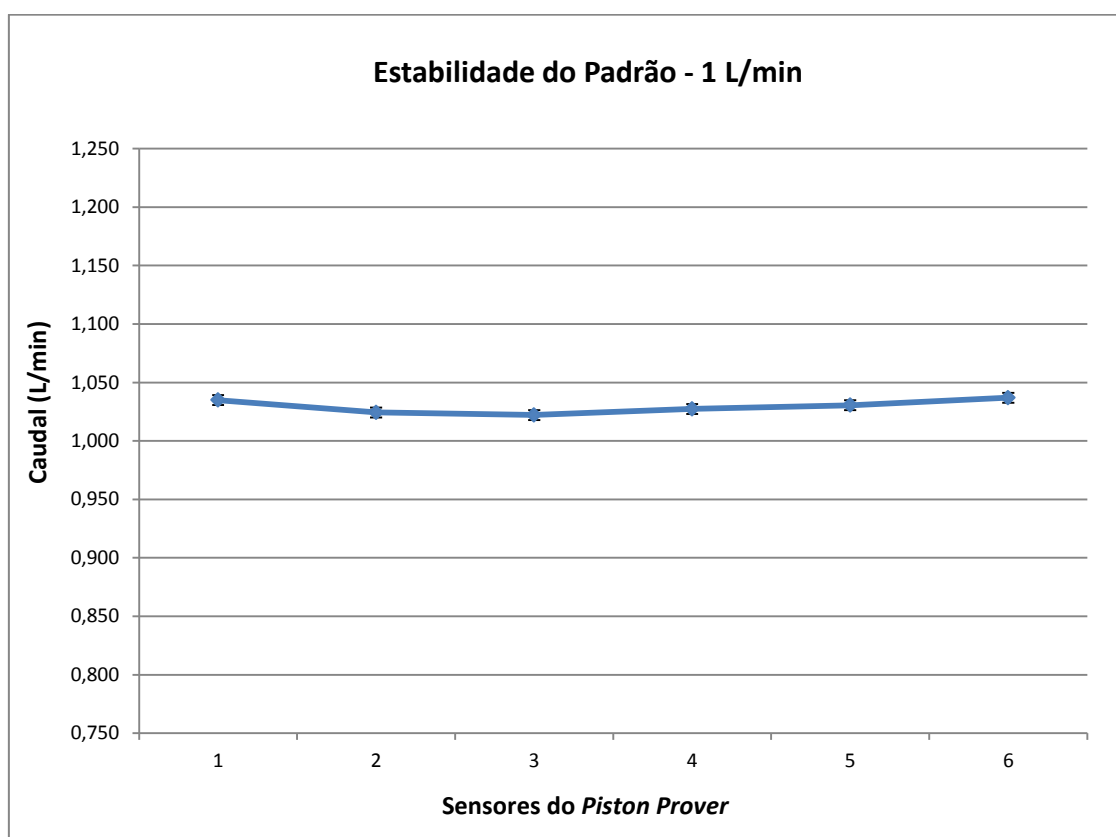


Figura 6.1 – Gráfico da estabilidade do padrão 1 L/min - 05 de junho de 2015

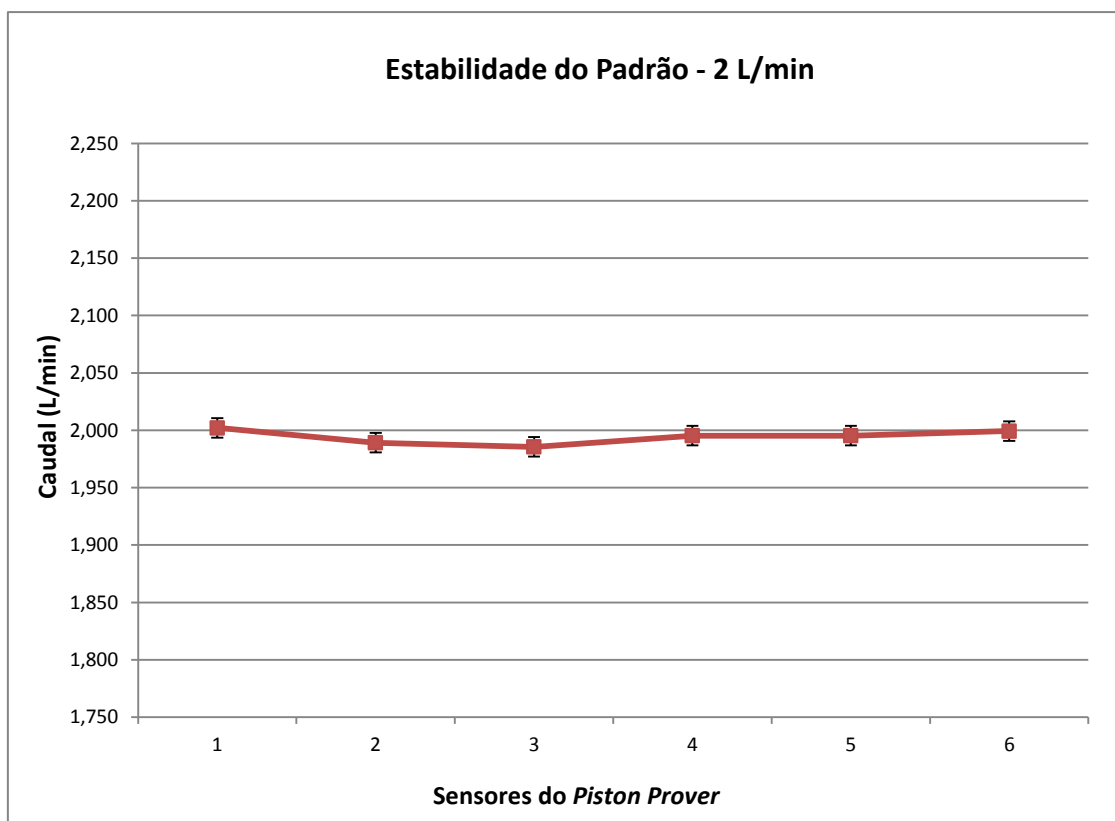


Figura 6.2 – Gráfico da estabilidade do padrão 2 L/min - 05 de junho de 2015

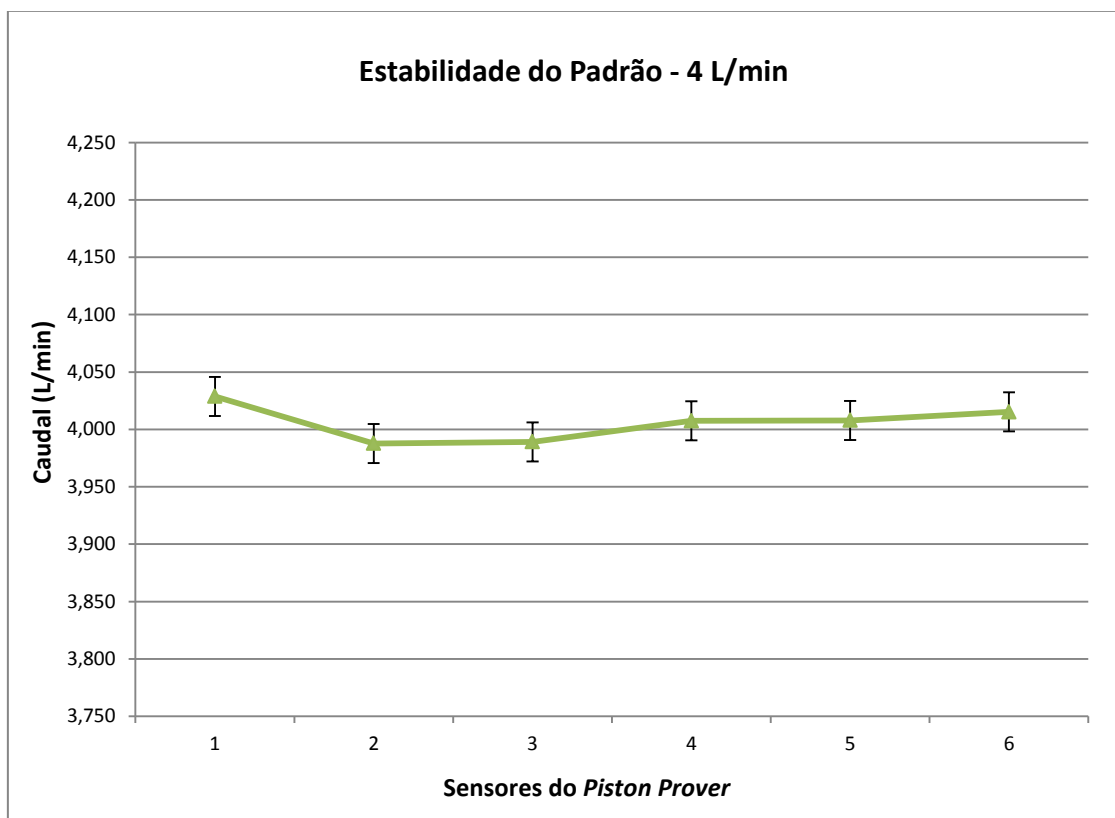


Figura 6.3 – Gráfico da estabilidade do padrão 4 L/min - 05 de junho de 2015

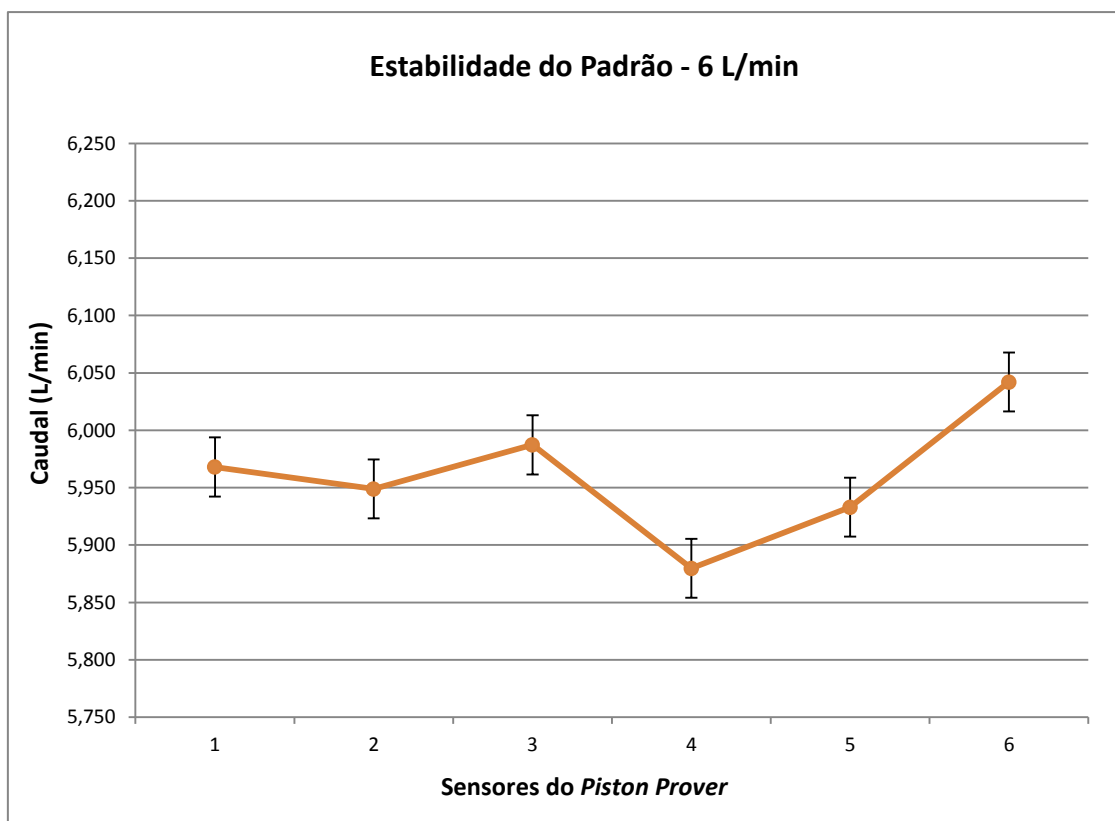


Figura 6.4 – Gráfico da estabilidade do padrão 6 L/min - 05 de junho de 2015

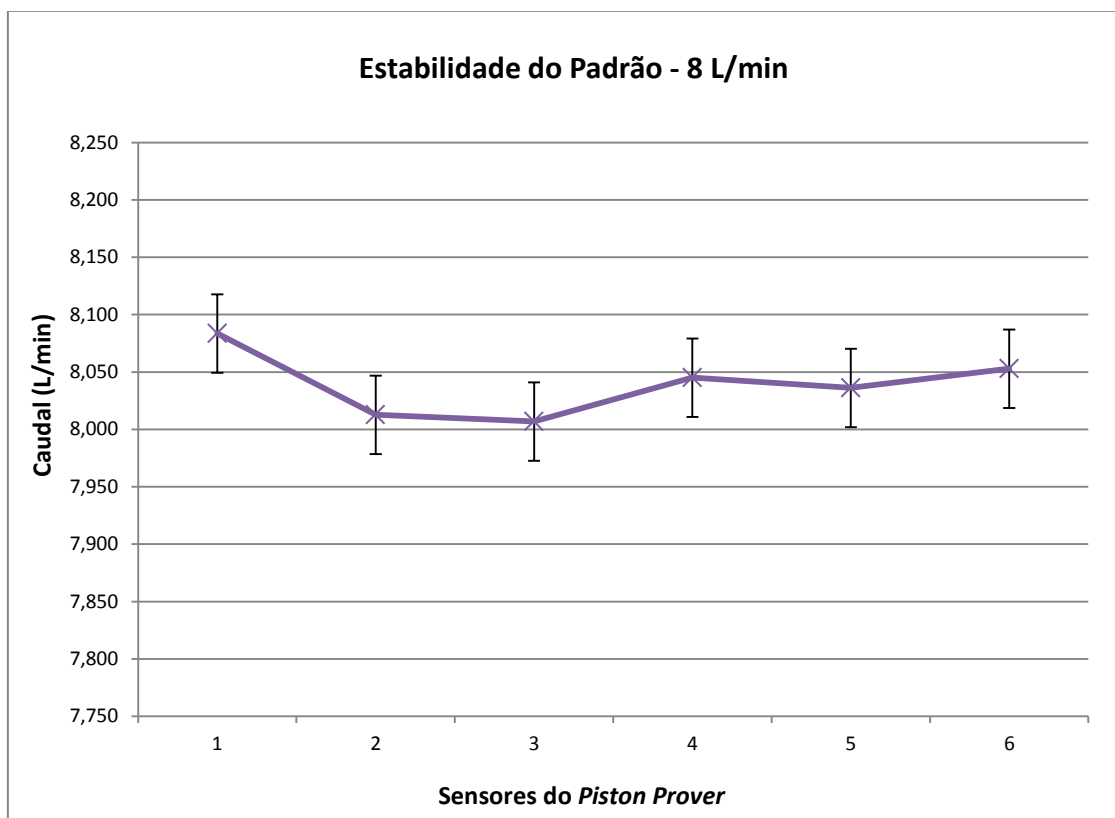


Figura 6.5 – Gráfico da estabilidade do padrão 8 L/min - 05 de junho de 2015

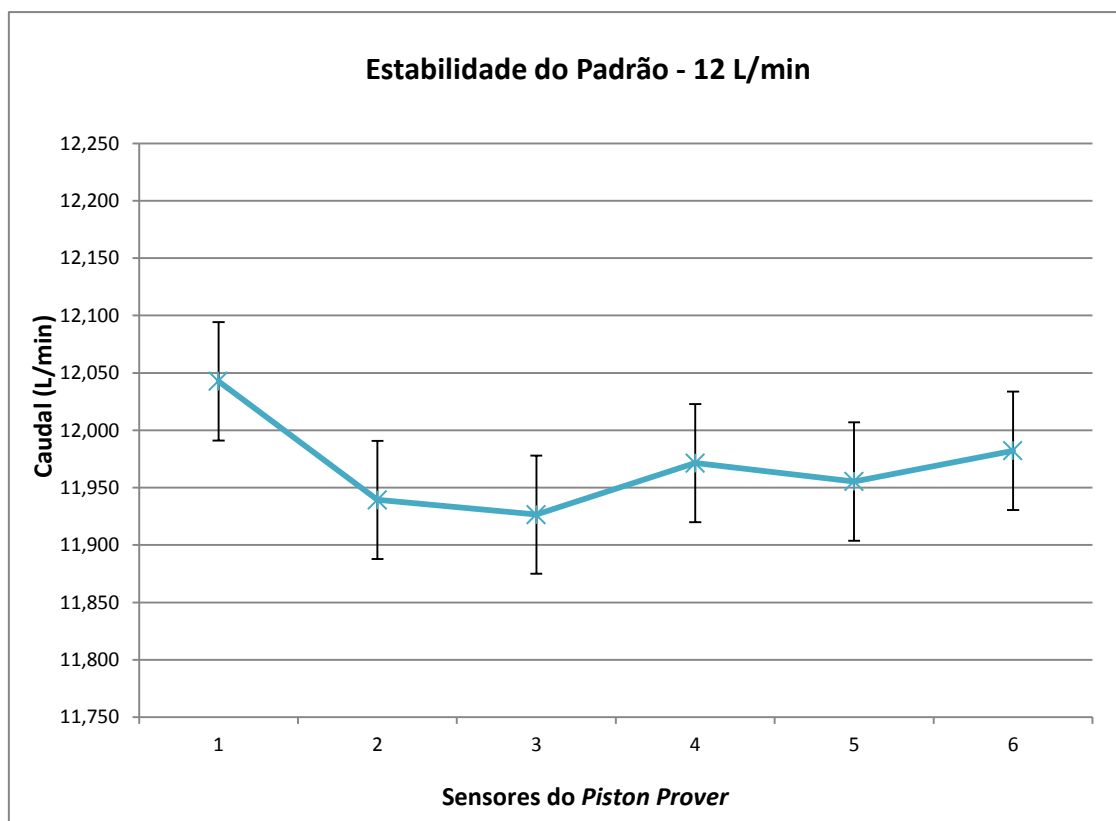


Figura 6.6 – Gráfico da estabilidade do padrão 12 L/min - 05 de junho de 2015

Tabela 6.1 – Estabilidade do padrão - 05 de junho de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	1,035	1,024	1,022	1,027	1,030	1,037	0,004
2	2,002	1,989	1,986	1,995	1,995	1,999	0,009
4	4,029	3,988	3,989	4,007	4,008	4,015	0,017
6	5,968	5,949	5,987	5,880	5,933	6,042	0,026
8	8,084	8,013	8,007	8,045	8,036	8,053	0,034
12	12,043	11,939	11,927	11,971	11,955	11,982	0,052

Tabela 6.2 – Estabilidade do padrão - 26 de agosto de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	0,990	0,981	0,982	0,979	0,983	0,974	0,004
2	2,068	2,065	2,062	2,063	2,048	2,071	0,009
4	4,001	3,961	3,961	3,972	3,962	3,966	0,017
6	5,999	5,992	5,999	6,000	6,009	6,005	0,026
8	8,114	8,044	8,056	8,085	8,077	8,095	0,034
12	11,975	11,873	11,873	11,924	11,908	11,932	0,052

Tabela 6.3 – Estabilidade do padrão - 28 de outubro de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	1,035	1,027	1,023	1,024	1,020	1,023	0,004
2	1,926	1,909	1,902	1,908	1,908	1,911	0,009
4	4,030	3,989	3,991	4,009	4,009	4,017	0,017
6	6,011	5,998	5,985	5,990	5,995	6,024	0,026
8	8,084	8,013	8,008	8,046	8,037	8,054	0,034
12	12,074	11,969	11,982	12,028	12,018	12,008	0,052

Tabela 6.4 – Estabilidade do padrão - 30 de dezembro de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	1,055	1,046	1,046	1,052	1,057	1,063	0,004
2	1,985	1,966	1,963	1,967	1,961	1,963	0,009
4	4,029	4,003	3,991	4,008	4,006	4,019	0,017
6	5,962	5,968	5,978	5,977	5,974	5,987	0,026
8	8,096	8,026	8,026	8,055	8,048	8,065	0,034
12	12,015	11,964	11,951	11,977	11,938	12,037	0,052

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que não existe variação significativa dos caudais medidos pelo *piston prover* em cada sensor para cada dia de ensaios, tal como em diferentes dias, visto que os resultados se encontram dentro da incerteza mútua, concluindo assim a existência de boa estabilidade e linearidade para os diversos caudais.

Desta forma, verifica-se que o padrão possui uma boa repetibilidade e reprodutibilidade no intervalo de medição testado, sendo possível usar este equipamento para a calibração de caudalímetros de gás, como era objetivo inicial deste trabalho.

6.1.2 – Gás e adaptadores de caudal utilizados

i) Gás utilizado no projeto

O azoto utilizado em todo o projeto revelou-se uma boa escolha visto que acabou por ser pouco dispendioso e de fácil preparação.

ii) Adaptadores de caudal utilizados no projeto

Concluiu-se também que os adaptadores utilizados no padrão foram úteis no processo de subida do pistão, durante todo o processo de calibração do caudalímetro, pois permitiram uma maior estabilidade e fluidez no caudal de gás, conseguindo-se leituras de valores mais constantes durante a calibração, principalmente para os caudais de valor mais baixo. Deste

modo sem o uso dos adaptadores de caudal na válvula de saída (outlet), seria difícil ou mesmo impossível utilizar o *piston prover* para obter os caudais mais baixos de uma forma constante.

6.2 – Calibração de caudalímetros de gás

Os resultados mais importantes obtidos durante a elaboração da dissertação, nomeadamente o cálculo dos erros para cada caudal estudado e as incertezas associadas na calibração de caudalímetros de gás, são apresentados neste subcapítulo.

Em anexo (Anexo C) são apresentados todos os resultados obtidos durante este processo.

6.2.1 – Cálculo de erros

Numa calibração é sempre necessário saber o valor medido pelo padrão e o valor medido pelo equipamento a calibrar por forma a se obter a diferença entre as duas leituras. Esta diferença é o erro da medição, que pode ser apresentado em valor nominal ou em valor percentual.

Desta forma, o erro de uma medição é determinado de acordo com as Equações 51 e 52, para um valor nominal e para um valor percentual, respetivamente:

$$\text{Erro (L/min)} = \text{Valor Medido} - \text{Valor do Padrão} \quad \text{Equação 51}$$

$$\text{Erro (\%)} = \left(\frac{\text{Valor Medido} - \text{Valor do Padrão}}{\text{Valor do Padrão}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 52}$$

Nos testes efetuados durante a elaboração da dissertação ao caudalímetro Bronkhorst, modelo EI-Flow F-201CV, realizados a vários caudais diferentes, verificou-se existir uma variação do erro, consoante o caudal que se estava a medir.

A variação do erro medido pelo sistema (padrão + caudalímetro), associado a cada caudal, é dada na Tabela 6.5 em valores percentuais, por forma a se perceber as diferenças encontradas entre o padrão e o caudalímetro. No gráfico da Figura 6.7 apresentam-se todos os valores dos erros medidos juntamente com as respetivas incertezas calculadas.

Tabela 6.5 – Erro médio do caudalímetro (%) para diferentes caudais

Erro Médio do Caudalímetro (%)		1 L/min	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min	12 L/min
Junho	01 Junho	9,52	5,72	2,01	1,13	0,55	0,25
	03 Junho	10,05	5,48	2,00	1,09	0,53	0,27
	05 Junho	9,88	5,68	2,02	1,11	0,54	0,26
Agosto	26 Agosto	10,42	5,32	2,09	1,10	0,51	0,28
	27 Agosto	10,49	5,42	2,09	1,12	0,53	0,24
	28 Agosto	10,19	5,28	2,10	1,09	0,53	0,31
Outubro	26 Outubro	10,51	5,54	2,03	1,10	0,53	0,26
	28 Outubro	9,89	5,58	2,02	1,13	0,55	0,25
	30 Outubro	10,54	5,62	2,03	1,14	0,53	0,25
Dezembro	28 Dezembro	10,54	5,59	2,09	1,14	0,51	0,25
	29 Dezembro	10,22	5,56	2,06	1,13	0,54	0,26
	30 Dezembro	10,22	5,55	2,05	1,12	0,53	0,25

Os erros percentuais associados a cada caudal variam, sendo maiores para caudais mais baixos. Isso deve-se ao facto de poder haver pequenas perdas de gás nas tubagens ou no padrão utilizado, para além da gama normal de medição do padrão utilizado ser mais próxima do valor de 12 L/min. Acresce ao referido que estas pequenas perdas são constantes durante todo o processo, independentemente do caudal analisado; logo para caudais menores estas perdas acabam por corresponder a um valor percentual do caudal total muito maior do que a mesma perda para caudais mais elevados. Ou seja, para caudais menores, como por exemplo 1 L /min, uma perda de 0,1 L/min corresponde a um valor percentual muito superior a uma perda de 0,1 L/min para um caudal de 10 L/min.

Assim, da observação dos valores apresentados na Tabela 6.5 chegou-se à conclusão que a variação do erro calculado é baixa ou quase nula para valores de caudal superiores a 6 L/min. Por sua vez é expectável que para caudais mais baixos sejam obtidos erros mais elevados, indo ao encontro do comportamento do caudalímetro de gás, tal como é indicado no certificado de calibração do fabricante do mesmo que se encontra em anexo (Anexo D).

6.2.2 – Cálculo das incertezas associadas a cada caudal

Uma vez analisados os valores obtidos no cálculo dos erros e verificando-se que o sistema utilizado apresenta erros muito baixos e aceitáveis para valores superiores a 6 L/min, calculou-se as respetivas incertezas combinadas e expandidas para cada caudal.

A incerteza expandida referente a cada caudal é dada na Tabela 6.6 para valores percentuais, tal como a apresentação prévia do cálculo dos erros associados a cada caudal.

Para além do cálculo das incertezas combinadas, foi também necessário determinar os graus de liberdade efetivos (Ve_f) e os fatores de expansão (k), que se encontram em anexo (Anexo C), por forma a se chegar às incertezas expandidas.

Através da análise dos resultados obtidos, pode-se observar que as incertezas expandidas calculadas associadas aos caudais superiores ou iguais a 4 L/min são semelhantes, não havendo praticamente nenhuma variação, independentemente do dia ou do mês. Isto deve-se ao facto de haver boa estabilidade no sistema para os caudais mais elevados. Contudo não se pode dizer o mesmo para caudais inferiores a 4 L/min.

Tabela 6.6 – Incertezas expandidas do caudalímetro (%) para diferentes caudais

Incertezas Expandidas do Caudalímetro (%)		1 L/min	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min	12 L/min
Junho	01 Junho	1,32	0,53	0,45	0,44	0,43	0,43
	03 Junho	1,06	0,59	0,46	0,44	0,43	0,43
	05 Junho	0,75	0,52	0,45	0,44	0,43	0,43
Agosto	26 Agosto	0,74	0,58	0,45	0,44	0,44	0,43
	27 Agosto	0,79	0,60	0,45	0,44	0,44	0,43
	28 Agosto	0,75	0,52	0,45	0,44	0,44	0,44
Outubro	26 Outubro	0,84	0,58	0,45	0,44	0,44	0,43
	28 Outubro	0,75	0,63	0,45	0,44	0,43	0,43
	30 Outubro	0,77	0,55	0,45	0,44	0,43	0,43
Dezembro	28 Dezembro	0,82	0,58	0,46	0,44	0,43	0,43
	29 Dezembro	0,85	0,55	0,45	0,44	0,43	0,43
	30 Dezembro	0,76	0,60	0,45	0,44	0,43	0,43

Nos anexos poder-se-á consultar de uma forma mais detalhada todos os valores das incertezas combinadas e expandidas, tanto a nível absoluto como percentual, assim como os fatores de expansão k e os números de graus de liberdade efetivos associados a cada caudal para cada dia de ensaio.

No gráfico da Figura 6.7 apresentam-se todos as incertezas calculadas associadas aos valores dos erros medidos para cada caudal.

6.2.3 – Erros e incertezas do caudalímetro para cada caudal

Depois de uma análise dos erros associados a cada caudal, assim como as incertezas calculadas, é possível representar graficamente o comportamento do caudalímetro para os vários caudais analisados.

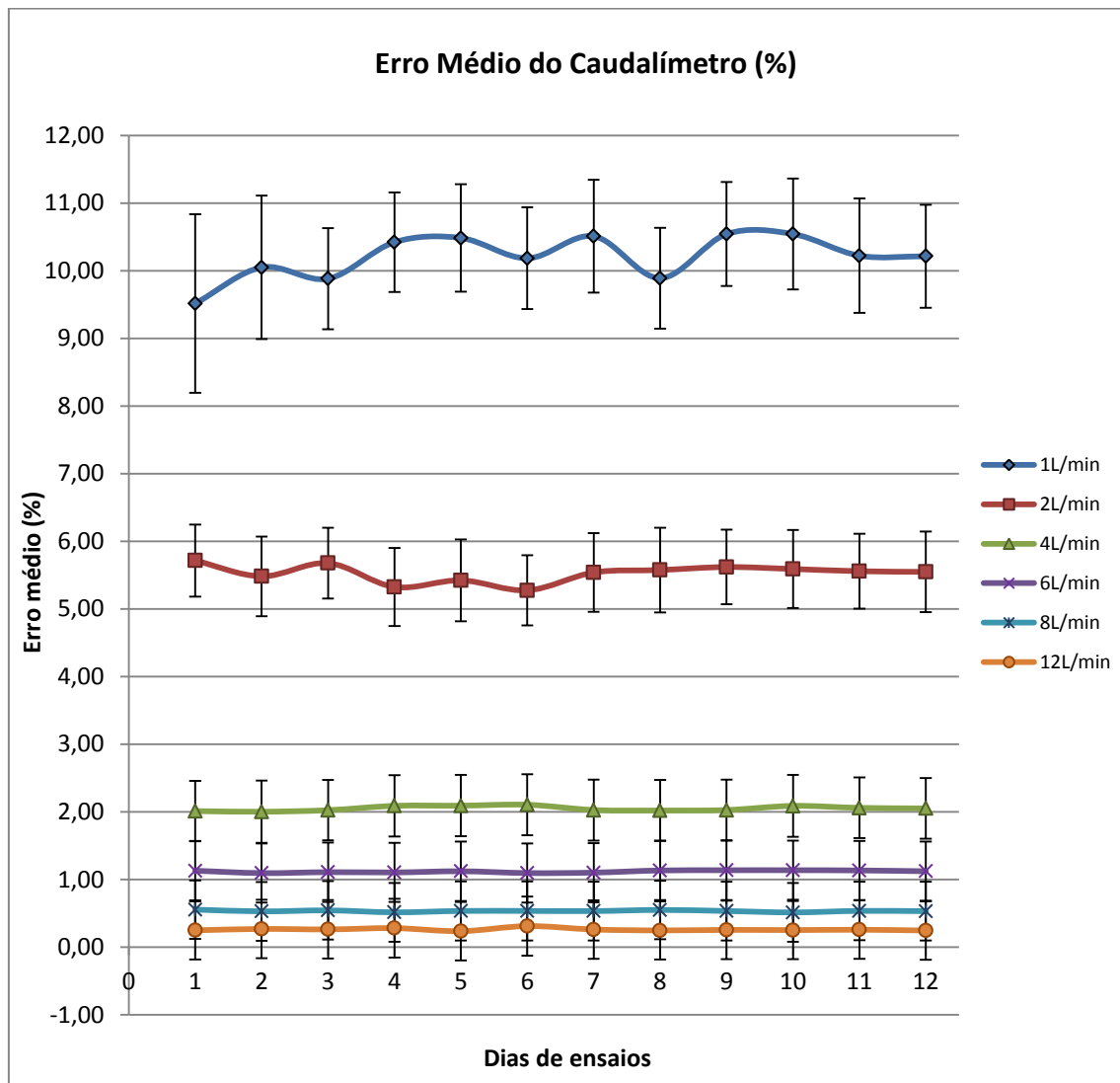


Figura 6.7 – Gráfico do erro médio do caudalímetro para diferentes caudais

Assim no gráfico da figura 6.7 é apresentado o erro médio do caudalímetro para cada caudal analisado, baseado em todos os ensaios efetuados ao longo do ano de 2015. Os pontos 1, 2, 3 no eixo dos “x” são referentes aos dias 01, 03 e 05 de junho respetivamente; os pontos 4, 5, 6 referentes aos dias 26, 27 e 28 de agosto; os pontos 7, 8 e 9 representam os dias 26, 28 e 30 de outubro respetivamente e os últimos três pontos são referentes aos dias 28, 29 e 30 de dezembro.

É também apresentado o valor da incerteza calculada associada a cada ponto do erro médio para cada caudal, sendo que esta varia um pouco para os caudais mais baixos (inferiores a 4 L/min) devido a alguma instabilidade do sistema.

6.3 – Análise e comparação de resultados

Depois de calculados os erros e as incertezas expandidas para cada caudal nos diferentes dias de testes, ao longo do segundo semestre de 2015, foi feito o cálculo do valor médio final dos erros e obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 6.7 e no gráfico da Figura 6.8.

Tabela 6.7 – Erro médio e incerteza expandida do caudalímetro (%) para cada caudal

Caudal (L/min)	1	2	4	6	8	12
Erro (%)	10,21	5,53	2,05	1,12	0,53	0,26
Incerteza Expandida (%)	0,85	0,57	0,45	0,44	0,43	0,43

São também apresentados na Tabela 6.8 e no gráfico da Figura 6.8, juntamente com os resultados obtidos em laboratório, os valores dos erros do caudalímetro obtidos da calibração de fábrica. Por sua vez, é também possível consultar estes valores no certificado do equipamento que se encontra no Anexo D.

Tabela 6.8 – Erro médio e incerteza expandida do caudalímetro (%) – valores de fábrica

Caudal (L/min)	1	2	4	6	8	12
Erro (%)	---	---	---	0,04	---	0,08
Incerteza Expandida (%)	---	---	---	0,4	---	0,4

Analisando e comparando os valores obtidos nos ensaios de laboratório com os valores do certificado de fábrica para o erro e a incerteza expandida do caudalímetro, observa-se através do gráfico da Figura 6.8 quais os caudais analisados em laboratório que estão em concordância a nível de erro com os valores obtidos de fábrica.

A nível de erro, apenas se podem comparar os valores obtidos para os caudais de 6 L/min e 12 L/min, uma vez que o certificado do fabricante só apresenta valores de erro para estes dois caudais. Para o caudal de 6 L/min, observa-se uma diferença a nível do erro não havendo consistência entre os resultados de laboratório e os do fabricante. Para o caudal de 12 L/min, as incertezas são praticamente iguais, estando o sistema em análise em concordância com os dados obtidos do certificado do fabricante; os valores de erro obtidos são mais próximos dos valores obtidos pelo fabricante do caudalímetro. Para os restantes valores de caudal abaixo de 6 L/min, nada se pode concluir. Porém, a curva do erro obtida em laboratório está em concordância com a curva típica de um caudalímetro de gás como se pode ver no gráfico do certificado do caudalímetro (Anexo D).

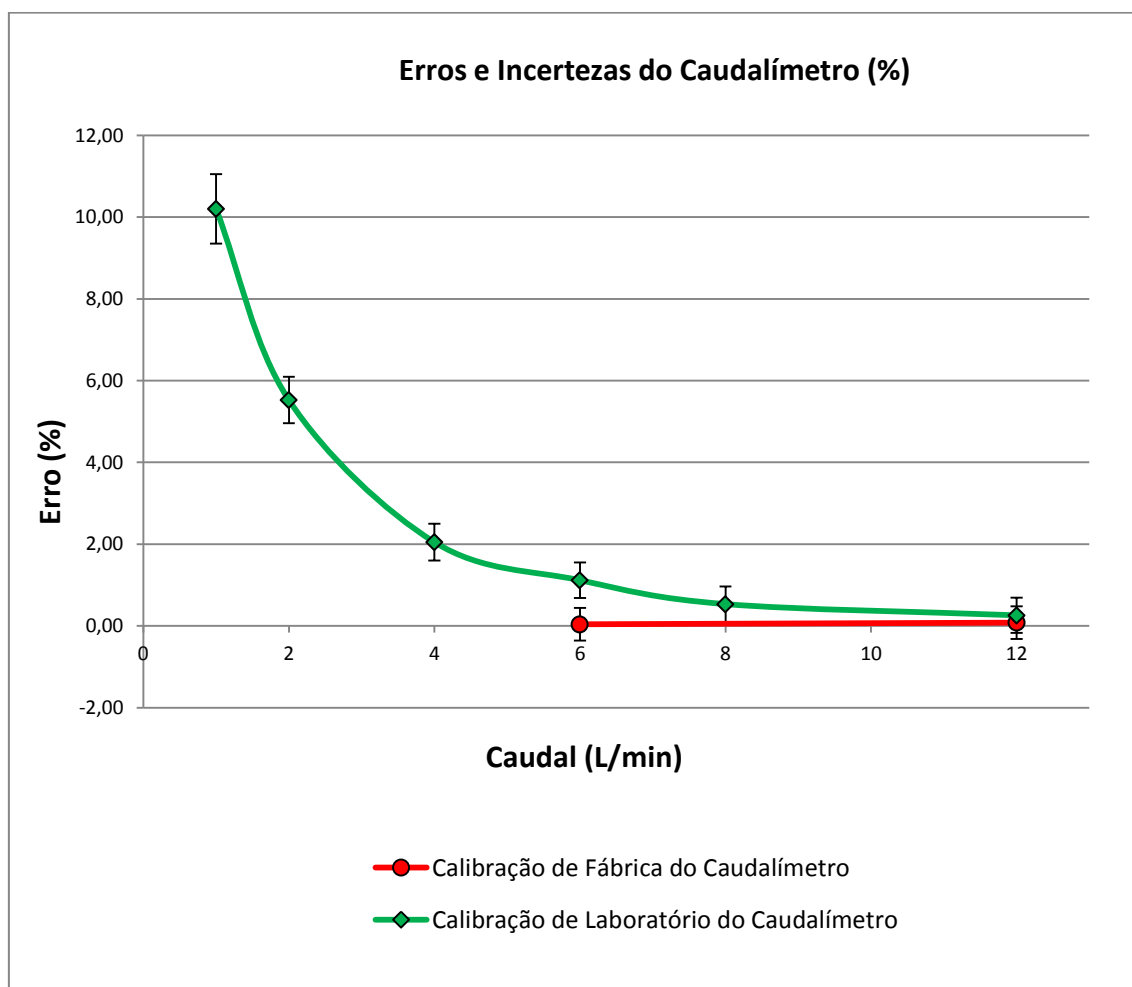


Figura 6.8 – Gráfico da comparação dos valores de laboratório com os valores de fábrica

A nível das incertezas, pode-se concluir que estas são praticamente iguais apresentando a mesma ordem de grandeza para os caudais iguais ou superiores a 4 L/min. Os caudais mais baixos de 1 L/min e 2 L/min apresentam incertezas mais altas, mas continuando a ser da mesma ordem de grandeza das incertezas apresentadas pelo certificado do fabricante do caudalímetro.

Capítulo 7 – Validação do Método

De forma a validar os resultados obtidos, foram realizados ensaios de repetibilidade e ensaios de reprodutibilidade ao sistema desenvolvido.

Tal como no estudo e análise da estabilidade do padrão, apresentado no capítulo 6.2.1, foram escolhidos os mesmos 4 dias de ensaios (05 de junho, 26 de agosto, 28 de outubro e 30 de dezembro de 2015) para a repetibilidade e reprodutibilidade.

7.1 – Repetibilidade

Através da análise gráfica dos erros associados à medição de cada um dos seis caudais diferentes considerados (1 L/min, 2 L/min, 4 L/min, 6 L/min, 8 L/min, 12 L/min), apresentados na Figura 7.1, Figura 7.2, Figura 7.3 e Figura 7.4, pode-se verificar que existe uma boa repetibilidade para todos os caudais analisados, não havendo uma grande variação nos vários ensaios para o erro verificado no caudalímetro, como se pode observar nos gráficos referentes aos 4 dias de ensaios escolhidos. Por forma a obter-se uma melhor representação gráfica da repetibilidade e evitando a sobreposição de cada um dos 6 caudais, foi dado um espaçamento entre os vários valores de cada caudal representados no eixo dos “x”.

Para os caudais iguais ou inferiores a 4 L/min, nota-se que existe uma pequena dispersão nos valores obtidos; contudo, esta não é significativa nem afeta a consistência dos resultados.

Com estes dados, pode-se afirmar e concluir que o sistema (*piston prover* + caudalímetro) consegue boa repetibilidade, com erros associados bastante baixos e aceitáveis para valores de caudal iguais ou superiores a 4 L/min. Para os caudais mais baixos, os erros são elevados, mas a repetibilidade é bastante boa, sendo que todos os resultados são consistentes, pois estão dentro das incertezas mútuas.

Pode-se assim concluir que o sistema é repetível em todos os caudais analisados neste trabalho, independentemente do dia de ensaios.

No Anexo C pode-se consultar e verificar a repetibilidade dos vários caudais para os restantes dias e concluir que é muito semelhante ou quase igual à repetibilidade verificada nestes quatro dias escolhidos para análise.

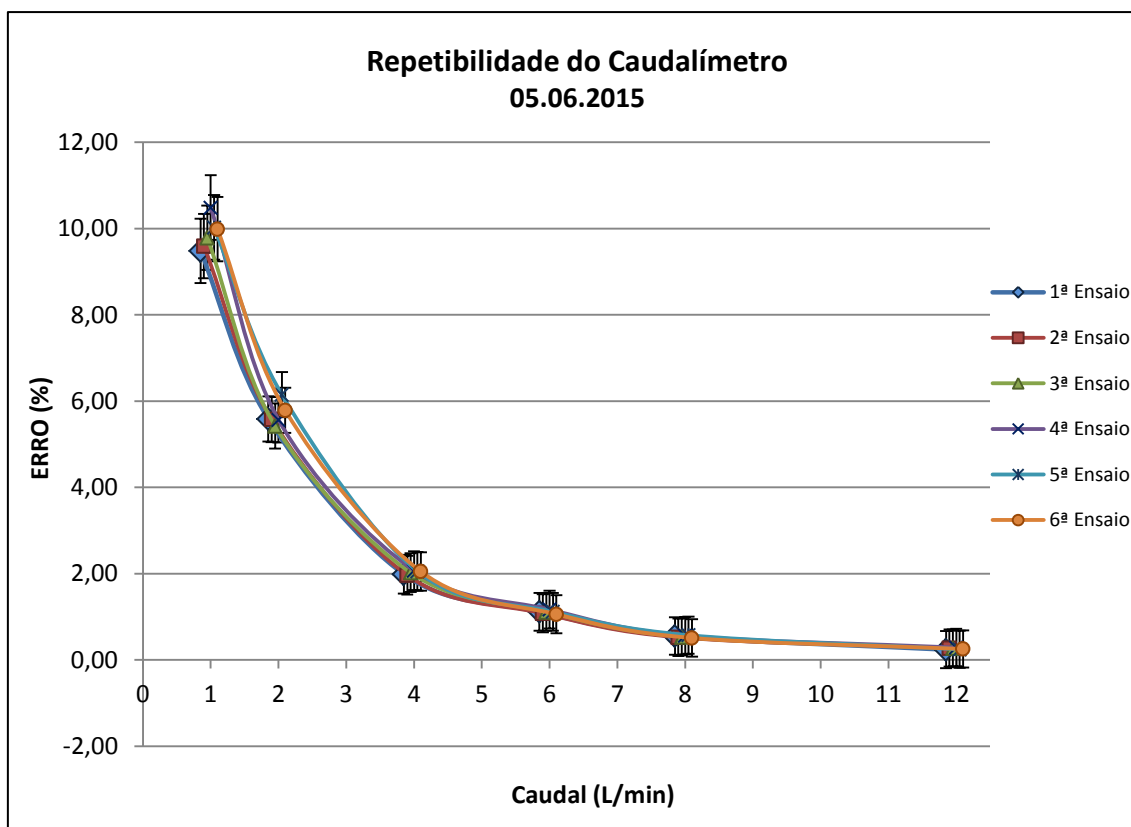


Figura 7.1 – Gráfico da repetibilidade do caudalímetro - 05 de junho de 2015

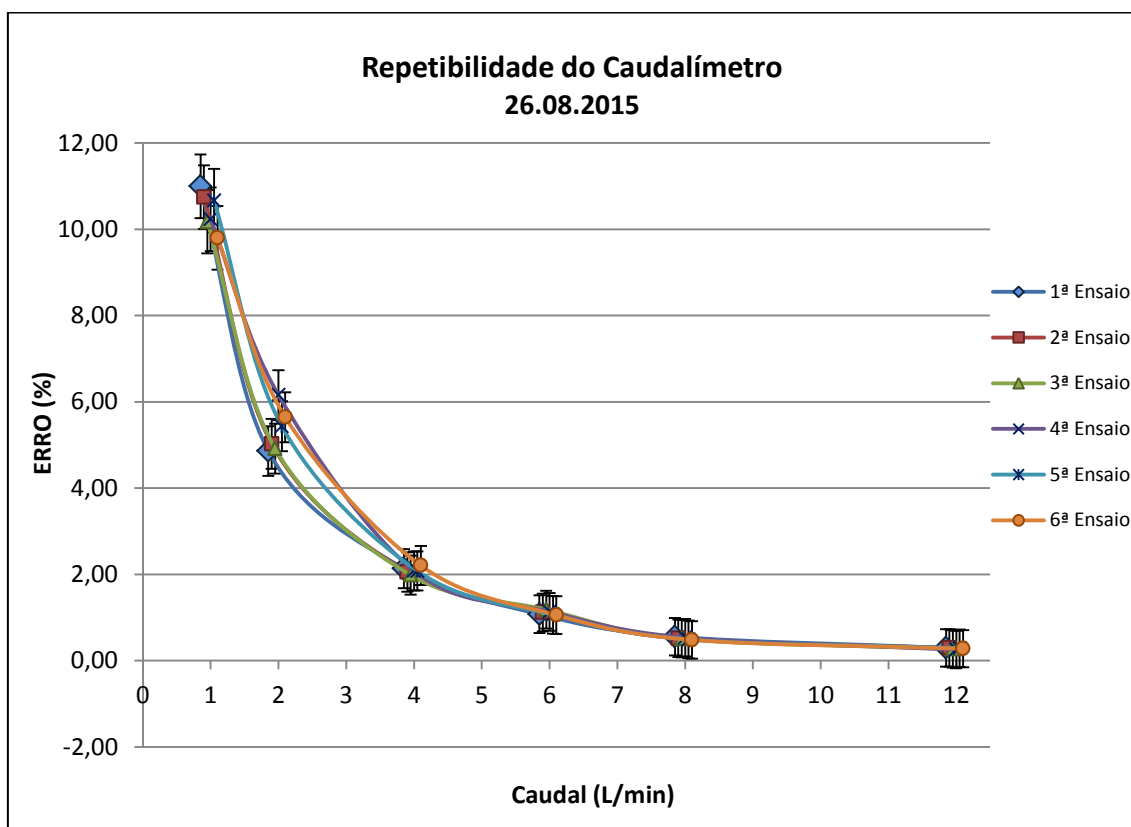


Figura 7.2 – Gráfico da repetibilidade do caudalímetro - 26 de agosto de 2015

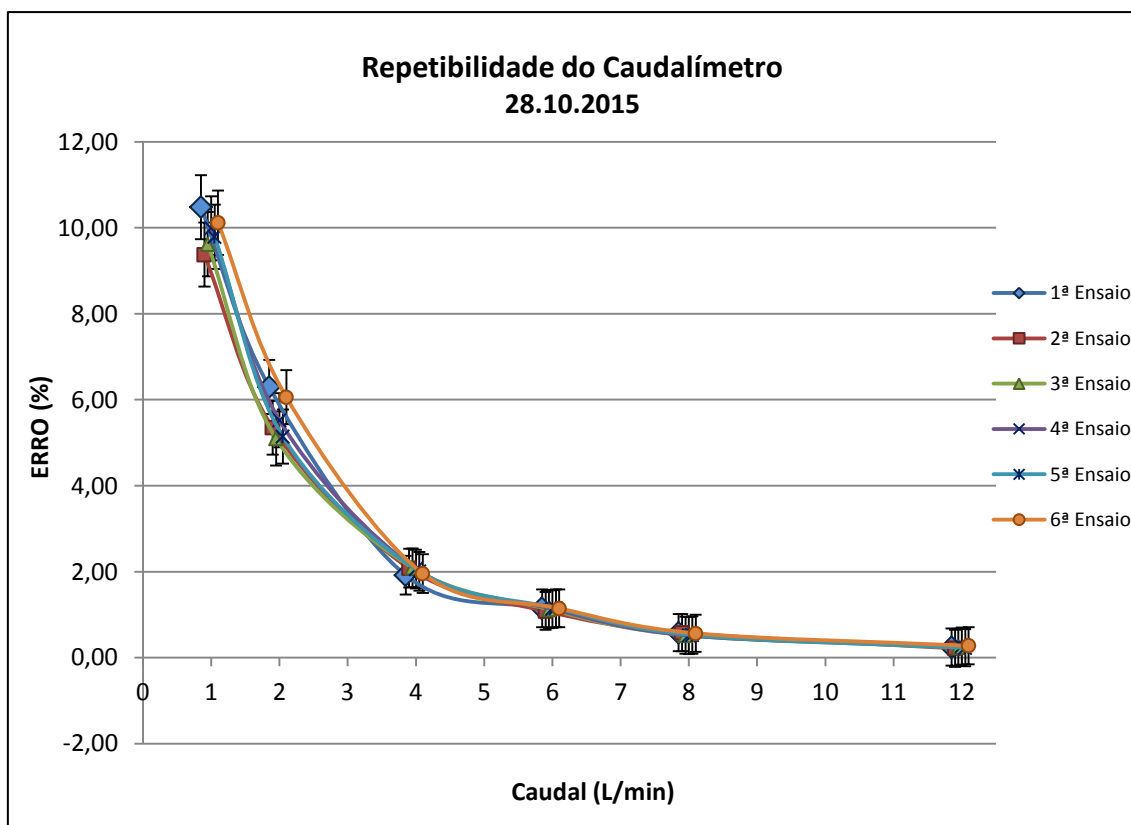


Figura 7.3 – Gráfico da repetibilidade do caudalímetro - 28 de outubro de 2015

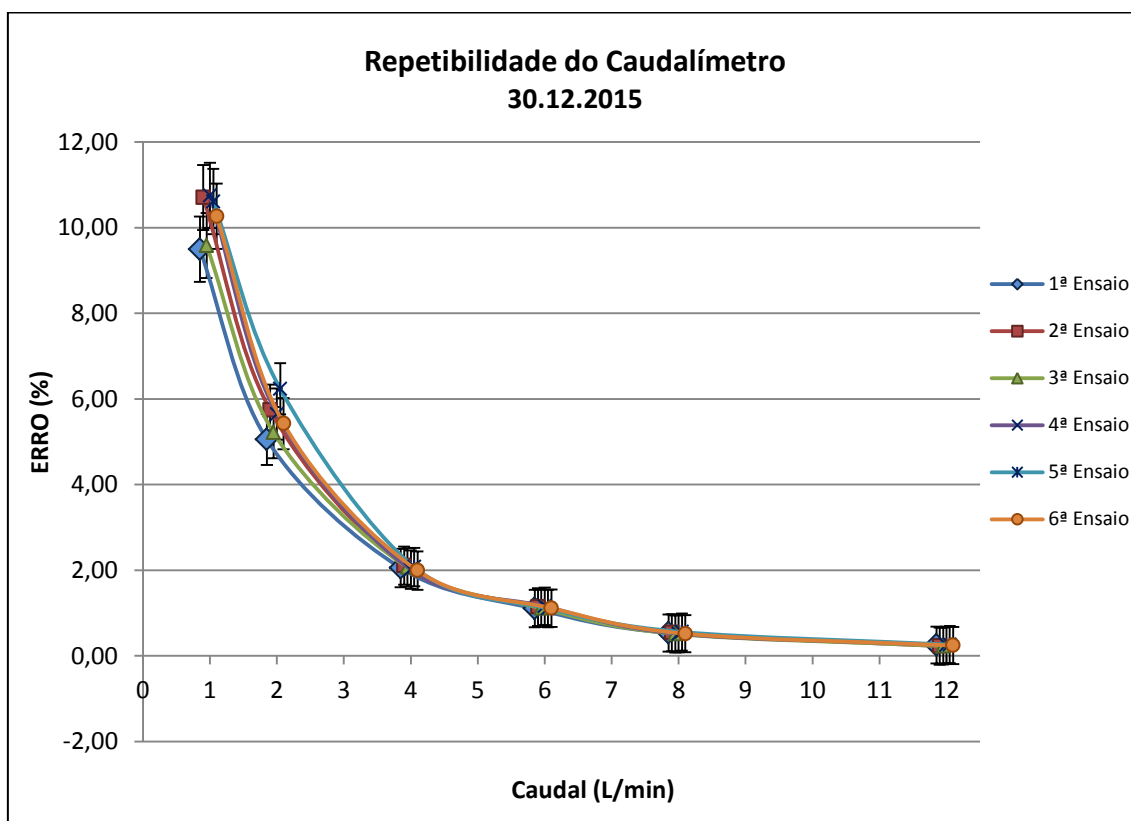


Figura 7.4 – Gráfico da repetibilidade do caudalímetro - 30 de dezembro de 2015

7.2 – Reprodutibilidade

Como se pode constatar através da análise gráfica da Figura 7.5, que mostra a variação dos erros associados a cada um dos seis caudais diferentes (1 L/min, 2 L/min, 4 L/min, 6 L/min, 8 L/min, 12 L/min) para os dias escolhidos dos 4 meses de ensaios, há também uma boa reprodutibilidade para todos os caudais, sendo que esta, para valores iguais ou superiores a 8 L/min, é tão boa que quase é impercetível perceber as pequenas variações que existem entre cada dia de ensaio.

Para caudais iguais ou inferiores a 4 L/min, notou-se novamente uma dispersão nos valores obtidos em cada caudal, mas não afetando a reprodutibilidade, pois mais uma vez os resultados a nível de reprodutibilidade encontram-se dentro da incerteza mútua, pelo que são consistentes.

Isto leva novamente a concluir que o padrão utilizado é adequado para estes caudais, necessitando, no entanto, de uma calibração por forma a que os erros associados à medição dos caudais mais baixos sejam minorados.

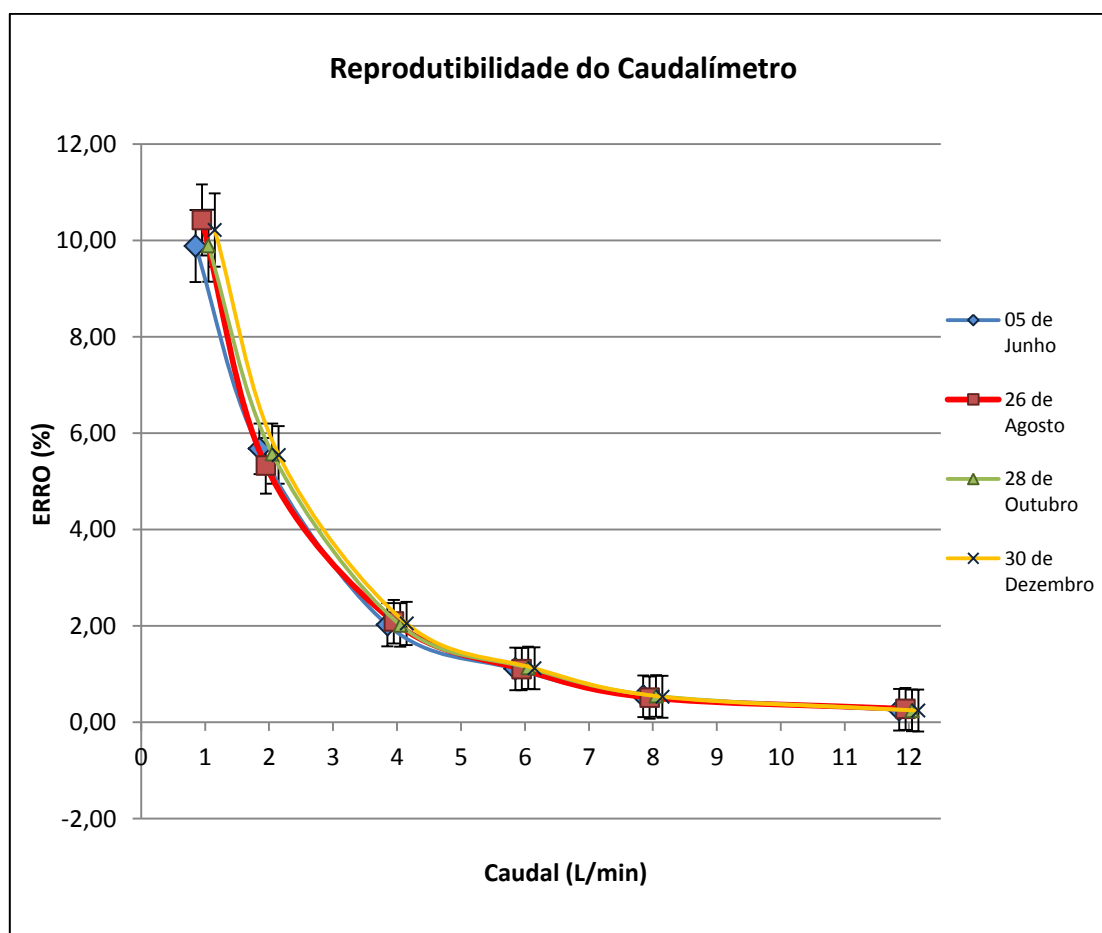


Figura 7.5 – Gráfico da reprodutibilidade do caudalímetro

Novamente, foram escolhidos os mesmos dias de ensaios que os da repetibilidade para a comparação de resultados, por forma a haver concordância e se poderem tirar conclusões fiáveis. Tal como nas representações gráficas da repetibilidade, teve que ser dado um espaçamento dos valores retirados nos vários ensaios para cada caudal de maneira a conseguir uma melhor e mais perceptível representação gráfica dos valores obtidos.

Para além do gráfico da reprodutibilidade da Figura 7.5, referente aos 4 dias escolhidos para serem analisados na validação do método, pode-se consultar em anexo (Anexo C) os gráficos da reprodutibilidade referentes aos ensaios efetuados em dias diferentes para cada mês.

Capítulo 8 – Conclusões e Sugestões

Este trabalho teve como objetivo a conceção, montagem e validação de um sistema de medição de gás com capacidade de medir caudais até 12 L/min, utilizando como padrão um *piston prover*.

Este padrão foi utilizado para a realização dos ensaios depois de ter estado parado durante algum tempo. Como tal, fez-se à priori uma verificação exaustiva dos vários componentes constituintes do padrão e a substituição de todos os vedantes e componentes danificados. Contudo, porque o equipamento esteve sem funcionar durante muito tempo, será necessário a sua calibração por uma entidade competente, de forma a se obterem os valores reais de erro.

Por sua vez, o caudalímetro utilizado no sistema foi comprado novo e veio calibrado/verificado de fábrica com certificado de calibração emitido por entidade não acreditada. Assim, não se pode garantir a rastreabilidade deste certificado devido à não acreditação do fabricante o que leva a concluir que este equipamento poderá fazer medições de caudal próximas da realidade, mas não é possível evidenciar a exatidão do instrumento.

Estabilidade do Sistema:

Pode-se concluir que há uma boa estabilidade do sistema para os caudais iguais ou superiores a 4 L/min, tanto pela análise da estabilidade do padrão como pela análise das incertezas. Contudo abaixo dos 4 L/min as incertezas associadas a cada caudal são maiores devido a alguma instabilidade no sistema, com origem em pequenas fugas não identificáveis que possam existir ou a alguma evaporação do gás utilizado como fluido de calibração.

Por outro lado, existe uma boa estabilidade proveniente do gerador de caudal (garrafa de azoto) para caudais mais elevados que consegue obter valores muito estáveis, acabando por ajudar a garantir alguma parte da estabilidade do sistema.

Devido à enorme área de superfície da base do pistão, o caudal pode-se tornar um pouco instável para valores mais baixos devido à velocidade extremamente baixa que o pistão adquire durante o tempo que este leva a percorrer o tubo de vidro.

Desta forma, para os caudais iguais ou superiores a 6 L/min conclui-se que há uma boa exatidão e uma boa precisão. Contudo para os caudais inferiores a 6 L/min pode-se apenas concluir que existe uma boa exatidão, ou seja, repetem-se bem os valores do erro para cada

caudal. Para estes mesmos caudais poderá haver uma fraca precisão, sendo necessário confirmar esta suposição através da calibração do *piston prover*.

Verifica-se que a baixa precisão do padrão para caudais mais baixos, deve-se ao facto de o mesmo precisar de ser ajustado, reparado e calibrado. Com uma nova calibração do padrão utilizado neste trabalho (*piston prover*), ir-se-á determinar o erro sistemático para cada caudal e assim será possível fazer as devidas correções.

Desta forma o padrão utilizado neste trabalho poderá medir valores de caudal mais próximos dos valores medidos pelo caudalímetro.

Erros:

Os erros positivos obtidos nos vários ensaios podem significar que o padrão utilizado, apesar de ter sido verificado, continua com pequenas fugas não identificáveis ou existir alguma evaporação de gás durante todo o processo de funcionamento, o que o pode levar a fazer leituras de caudal um pouco mais baixas que o caudal que de facto está a ser medido. No entanto estas perdas são constantes e mínimas, levando o padrão a fazer medições estáveis durante todo o processo, garantindo uma boa repetibilidade e reprodutibilidade.

Contudo, como o *piston prover* não está calibrado, não se podem tirar conclusões acerca dos erros do sistema. Só depois de calibrado se conseguirá saber os respetivos erros sendo então possível fazer as devidas correções e chegar a uma conclusão final.

Incertezas:

As incertezas da calibração de fábrica do caudalímetro e as incertezas da calibração realizadas no sistema, em laboratório, são baixas e quase idênticas, sobretudo as incertezas dos caudais iguais ou superiores a 4 L/min. Isto leva a concluir que o método em estudo é adequado e aceitável para calibrar caudalímetros de gás.

Por outro lado, as incertezas dos caudais estudados neste trabalho apresentam sempre a mesma ordem de grandeza e são constantes, o que leva novamente a concluir que existe boa estabilidade do sistema.

Repetibilidade e Reprodutibilidade:

Conclui-se que a repetibilidade e reprodutibilidade do sistema é boa para todos os caudais analisados devido a boa estabilidade do sistema. Todos os resultados são consistentes porque todos os valores estão dentro das incertezas mútuas tal como se pode ver nas tabelas e gráficos apresentados.

Com este estudo, por último, atinge-se cientificamente os objetivos propostos, tendo seguido o método anunciado na introdução. Realizou-se a elaboração e montagem do sistema de medição de gás no laboratório de volume e caudal do IPQ e conseguiu-se concluir, depois de vários ensaios, que o *piston prover* utilizado neste trabalho, fazendo uso do azoto como fluido de calibração, poderá ser utilizado como padrão para calibração de caudalímetros, de acordo com o procedimento de calibração redigido, desde que seja calibrado. Cumprindo este aspeto, o *piston prover* estará apto a ser utilizado permitindo assim que o Laboratório de Volume e Caudal possa começar a realizar prestação de serviços para clientes.

Referências Bibliográficas

- [1] E. Batista, Apresentação – Estruturas da Qualidade, LCM - Instituto Português da Qualidade, Documento interno, 2010.
- [2] IPQ, “IPQ - Instituto Português da Qualidade”, (Online). Disponível na Internet: www.ipq.pt. [Acedido em 06 de janeiro de 2015].
- [3] “Decreto-Lei n.º 71/2012,” Diário da República, 1.ª série - N.º 58
- [4] Livro oficial do Instituto Português da Qualidade (IPQ), Ministério da Economia e da Inovação, 2014
- [5] H. Preben e R. Fiona, Metrology - In Short, Terceira edição, EURAMET, 2008.
- [6] E. Batista, Apresentação – Metrologia, LCM - Instituto Português da Qualidade, Documento interno, 2010.
- [7] E. Batista, Apresentação - Calibração de Material Volumétrico, LCM - Instituto Português da Qualidade, Documento interno, 2010.
- [8] IPQ, VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia, 1ª edição Luso-Brasileira ed., Caparica, 2012.
- [9] E. Batista, Apresentação - Volume, LCM - Instituto Português da Qualidade, Documento interno, 2010.
- [10] NP EN ISO 4787 - Vidraria de laboratório. Instrumentos volumétricos. Métodos para ensaio da capacidade e para utilização, 2ª ed., 2011.

[11] E. Batista, Apresentação – Medição de Caudal, LCM - Instituto Português da Qualidade, Documento interno, 2010.

[12] J. D. Wright, “What is the “best” transfer standard for gas flow?”, National Institute of Standards and Technology, Groningen, Netherlands, 2003.

[13] J. D. Wright, G. E. Mattingly, “NIST Calibration Services for Gas Flow Meters – *Piston prover* and Bell Prover Gas Flow Facilities”, U.S. Department of Commerce Technology Administration – National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication, Washington, 1998

[14] Brooks Instruments, “Brooks Instruments”, (Online). Disponível na Internet: www.brooksinstrument.com [Acedido a 08 de dezembro de 2015].

[15] Bronkhorst, “Bronkhorst”, (Online). Disponível na Internet: www.bronkhorst.com [Acedido a 17 de dezembro de 2015].

[16] A. Cruz, Incerteza de Medição – Introdução ao Conceito, Instituto Português da Qualidade, 2001.

[17] JCGM 100:2008, GUM – Evaluation of measurement data - Guide to expression of uncertainty in measurement, 1ª edição, 2008.

[18] J. C. Silva, Manual de elaboração de relatórios e tratamento de resultados experimentais, Versão 4.2, FCT-UNL, fevereiro 2005.

[19] EURAMET, Metrology – In Short, 3rd edition, July 2008.

[20] IPQ, Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração, 2ª edição, Caparica 2005

Anexos

Este capítulo apresenta todos os valores obtidos e calculados para este trabalho, que são apresentados em forma de tabela ou gráfico. São também apresentadas as imagens de todo o projeto desenhado em CAD, tal como as imagens da matriz de calibração criada para ser usada juntamente com o padrão na calibração de caudalímetros. Por fim são apresentados os certificados dos equipamentos utilizados neste trabalho.

De uma forma simples e resumida, o capítulo apresenta-se da seguinte forma:

- Anexo A – Imagens do projeto em CAD
- Anexo B – Matriz de calibração criada para ser usada com o padrão
- Anexo C – Gráficos e tabelas de valores obtidos
 - Anexo C.1 – Gráficos e tabelas da estabilidade do padrão
 - Anexo C.2 - Listagem dos erros obtidos em todos os ensaios efetuados
 - Anexo C.3 – Listagem das incertezas calculadas para cada um dos dias de ensaio
 - Anexo C.4 – Gráficos da repetibilidade para cada dia de ensaios
 - Anexo C.5 – Gráficos da reprodutibilidade para cada mês
- Anexo D – Certificados de calibração dos equipamentos

Anexo A – Imagens do Projeto em CAD

i) Imagens do padrão

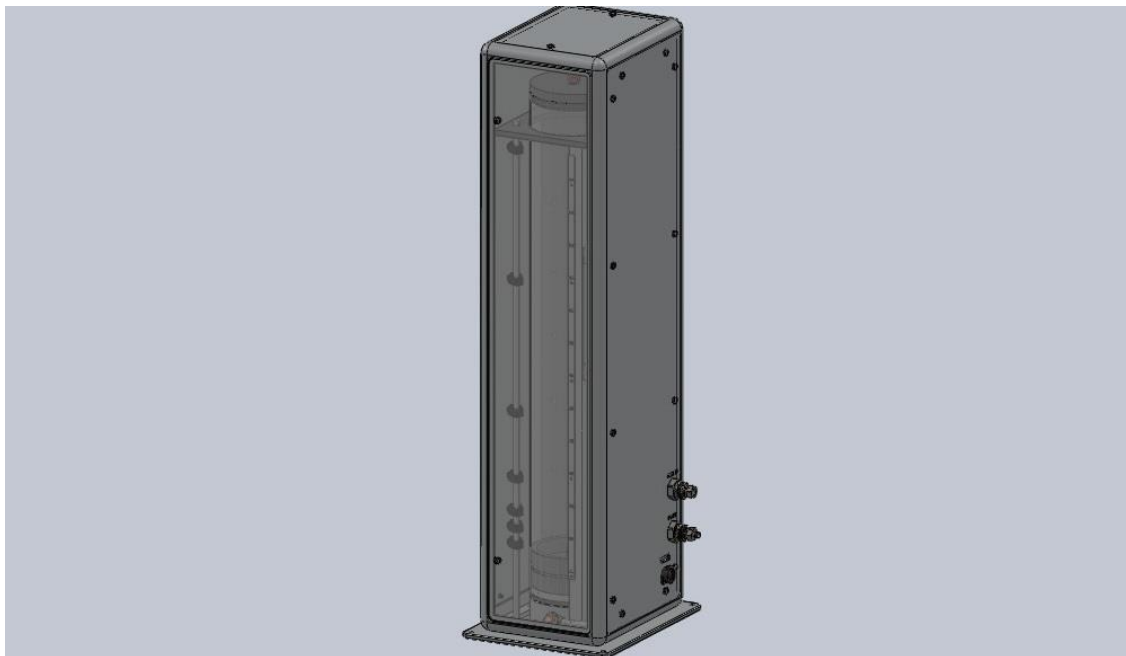


Figura A.1 – *Piston prover* (padrão)

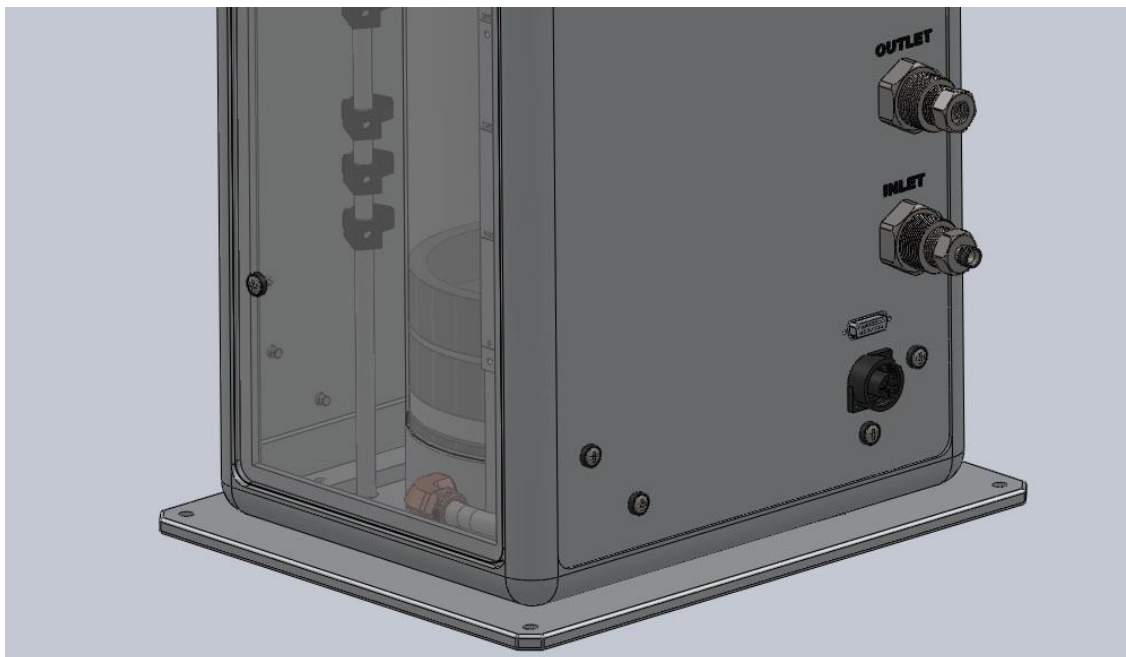


Figura A.2 – *Piston prover* – Detalhe das válvulas de entrada e saída (padrão)

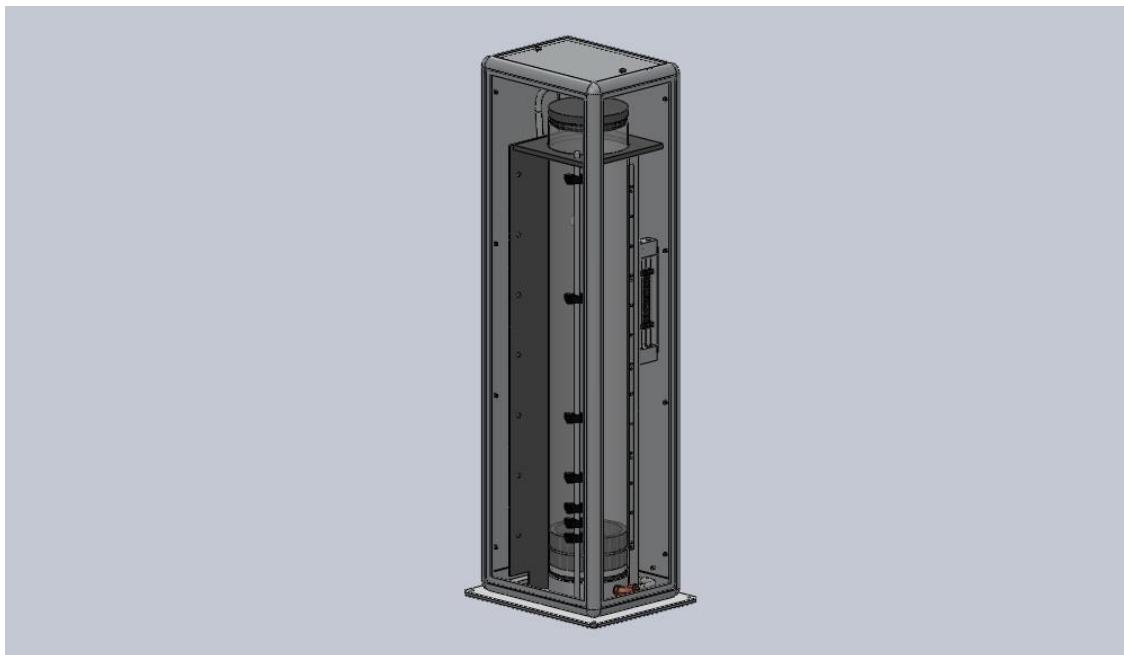


Figura A.3 – *Piston prover* (padrão)

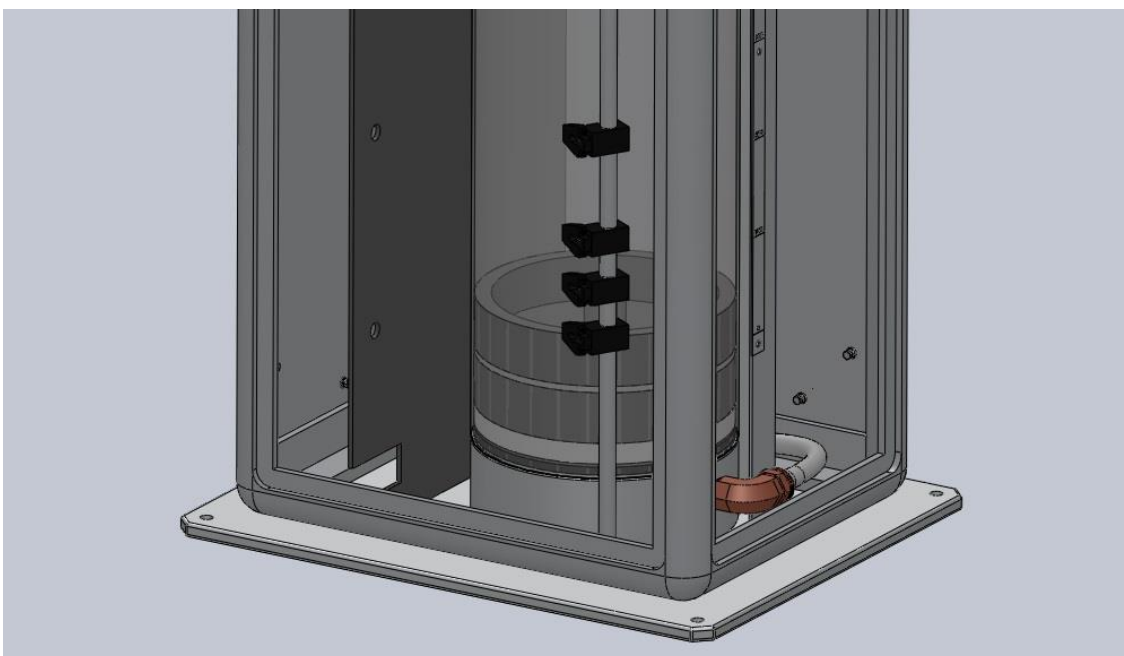


Figura A.4 – *Piston prover* – Detalhe dos sensores (padrão)



Figura A.5 – Unidade de leitura e controlo do *piston prover* (padrão)

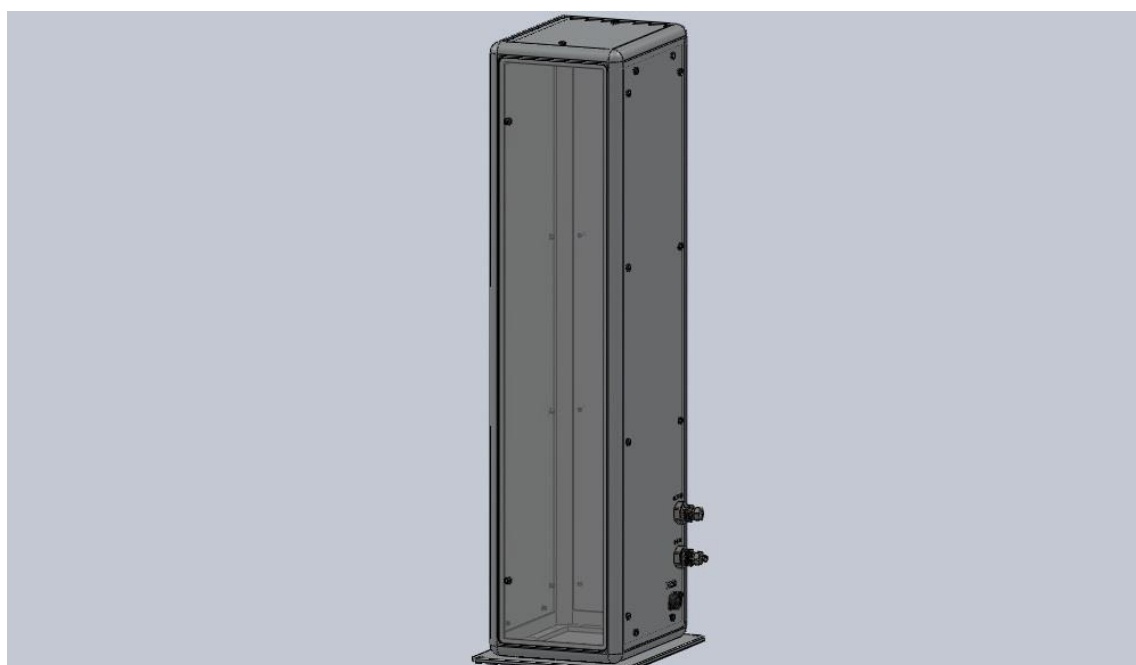


Figura A.6 – Estrutura exterior do *piston prover* (padrão)

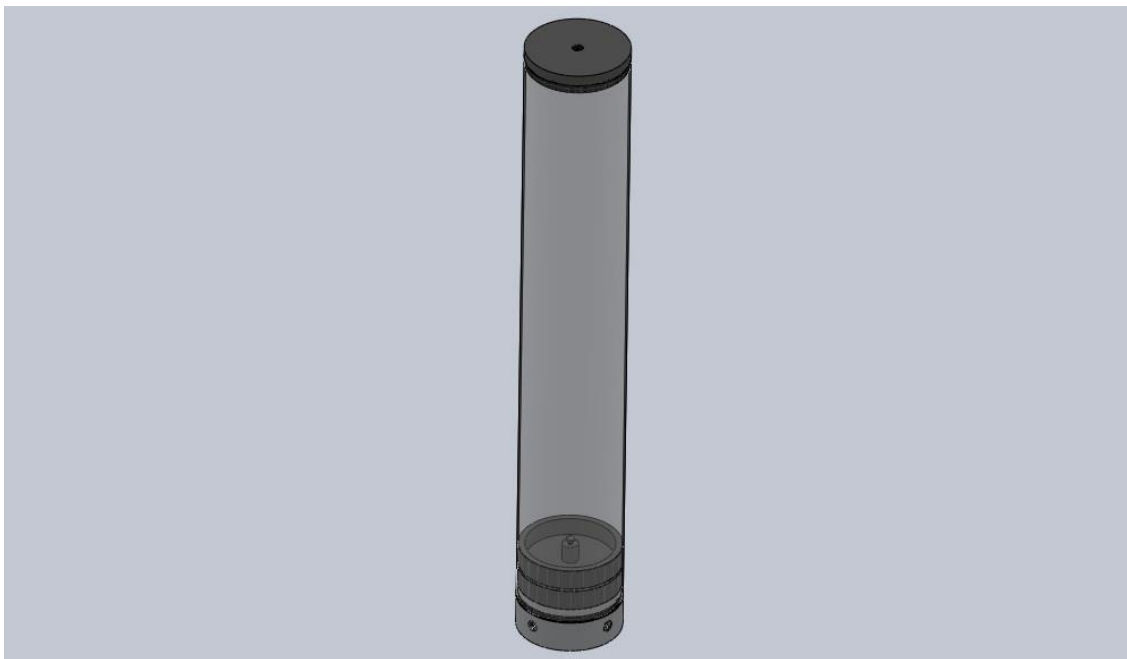


Figura A.7 – Tubo e êmbolo do *piston prover* (padrão)

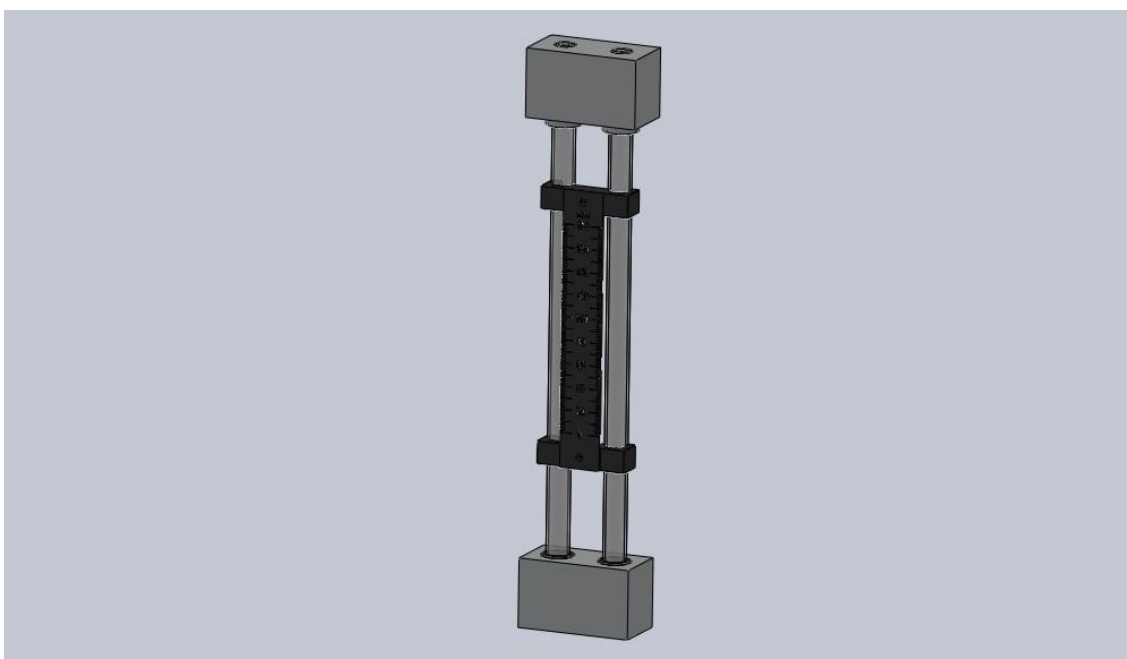


Figura A.8 – Medidor da pressão debaixo do êmbolo do *piston prover* (padrão)



Figura A.9 – Garrafa de azoto (padrão)



Figura A.10 – Garrafa de azoto – Detalhe da garrafa com torneira e mano-redutor (padrão)

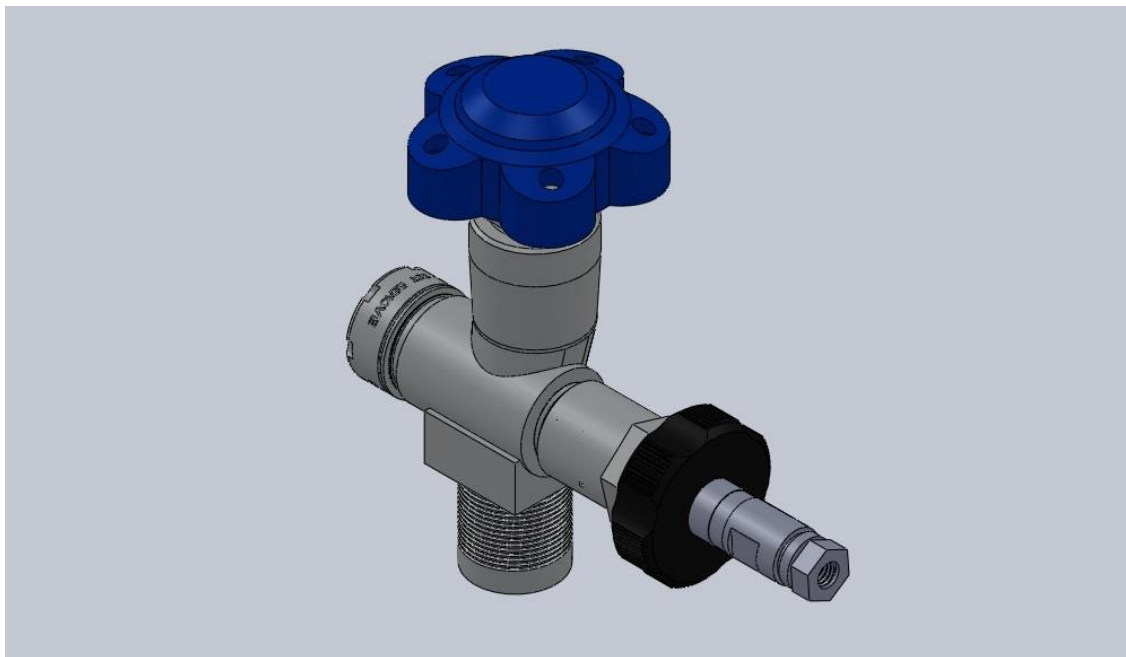


Figura A.11 – Torneira usada na garrafa de azoto (padrão)



Figura A.12 – Mano-reductor usado na garrafa de azoto (padrão)

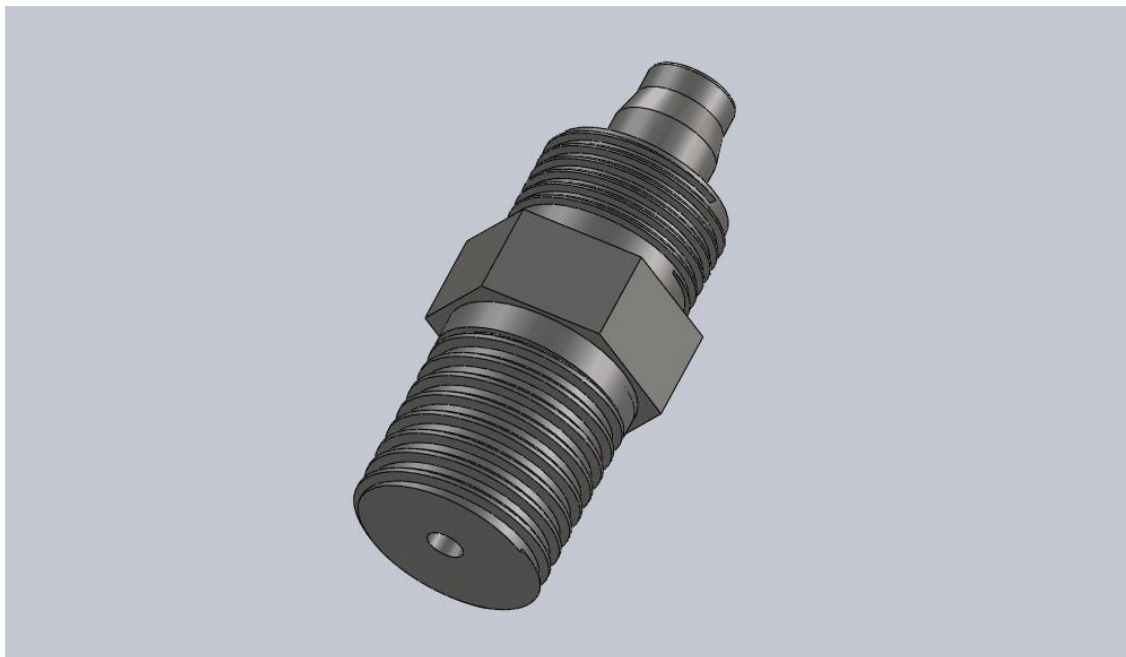


Figura A.13 – Adaptador para controlo de caudal de gás com 2,5 mm de diâmetro (padrão)

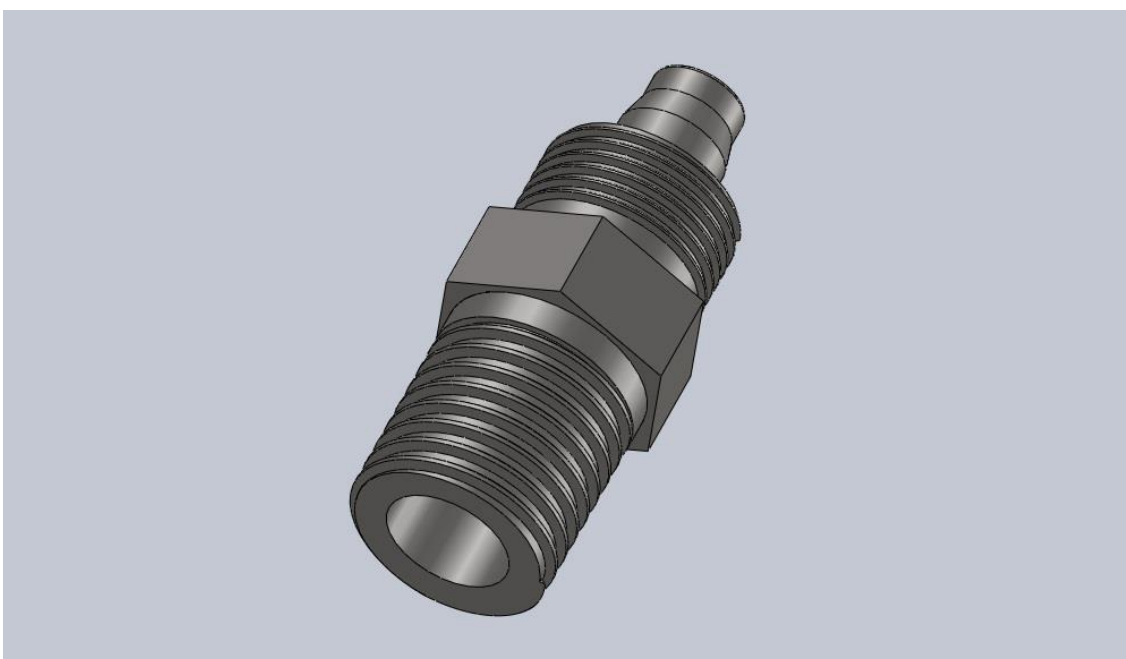


Figura A.14 – Adaptador para controlo de caudal de gás com 5 mm de diâmetro (padrão)

ii) Imagens do equipamento a calibrar

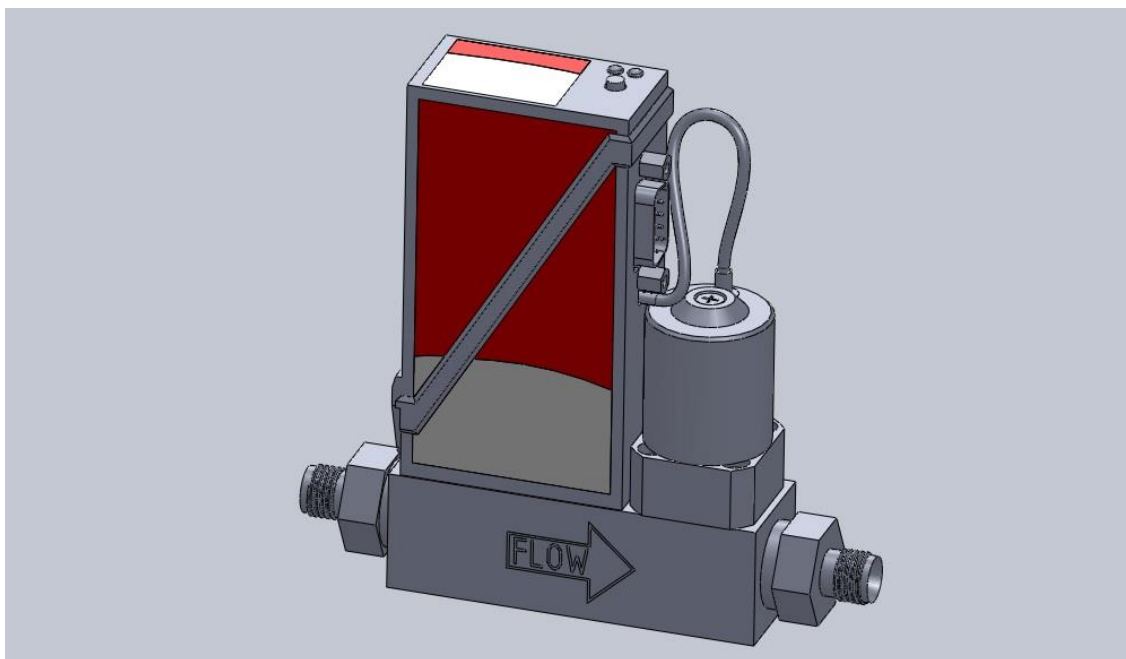


Figura A.15 – Caudalímetro – vista frontal (equipamento a calibrar)

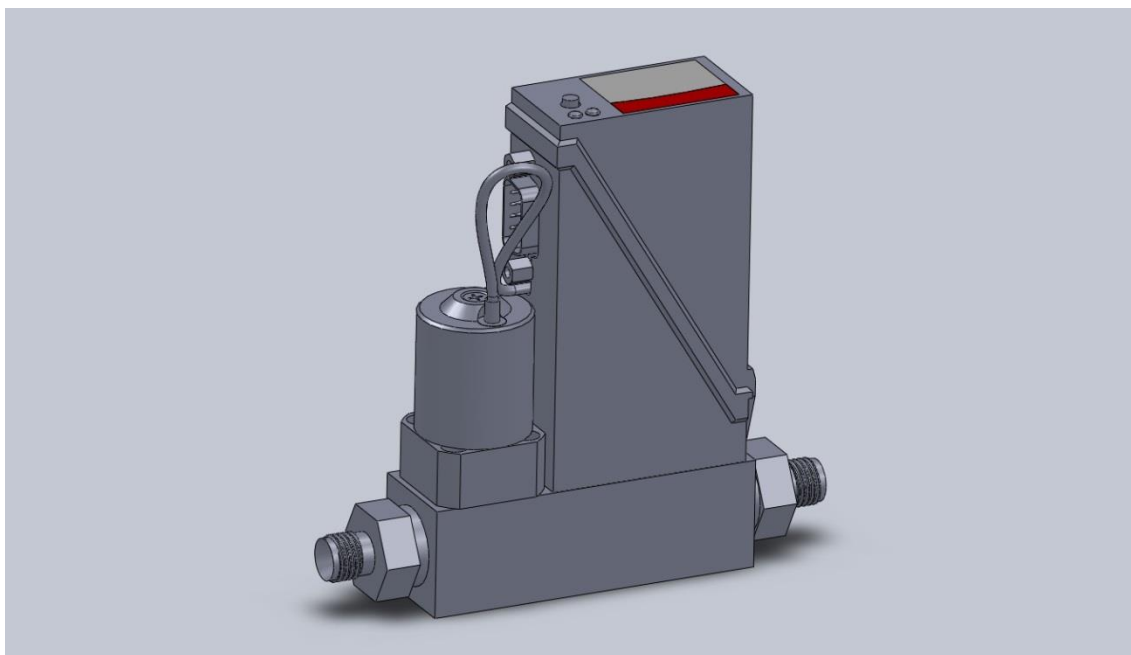


Figura A.16 – Caudalímetro – vista traseira (equipamento a calibrar)

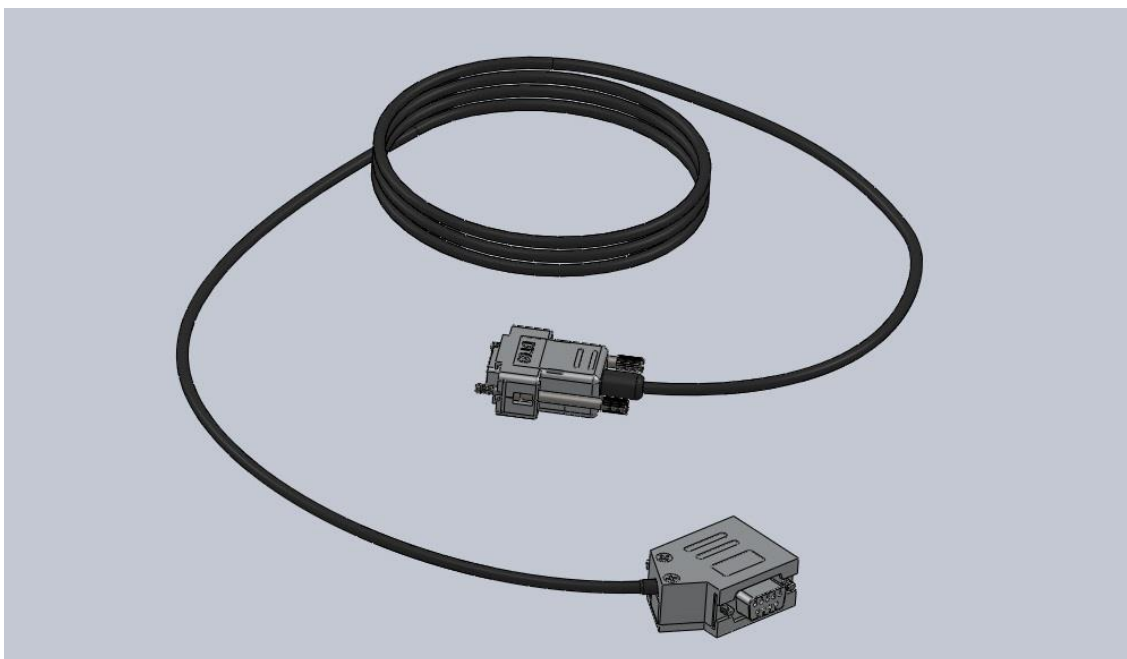


Figura A.17 – Cabo RS-232 do caudalímetro (equipamento a calibrar)

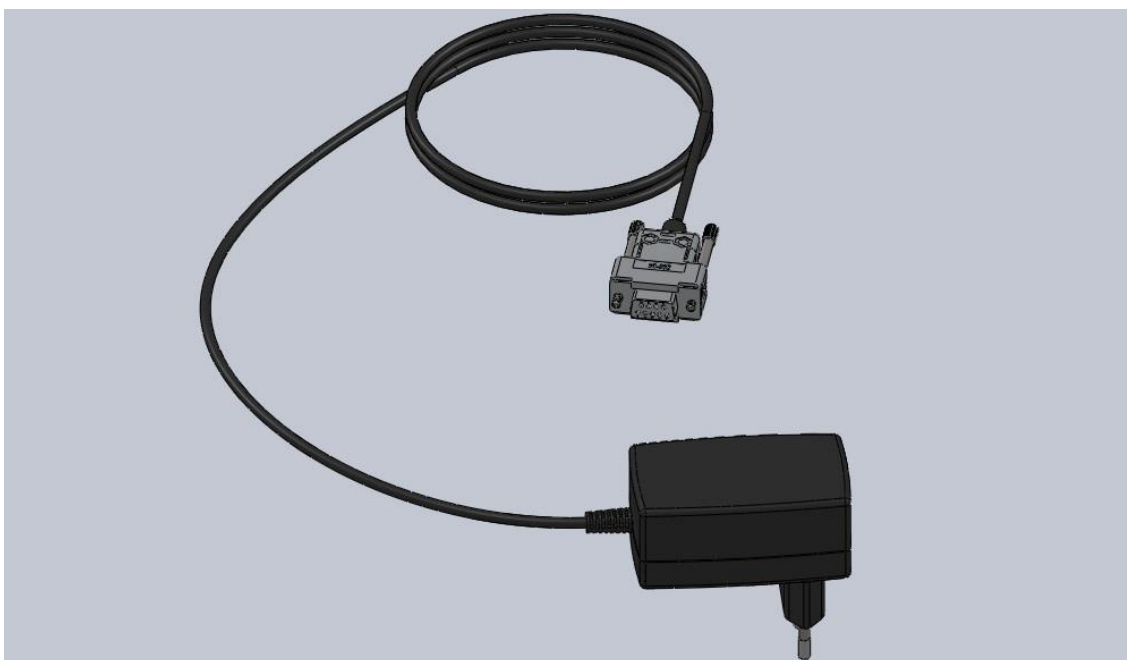


Figura A.18 – Cabo de energia do caudalímetro (equipamento a calibrar)

Anexo B – Matriz de Calibração


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2			<div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Calibração de Caudalímetros até 12 L/min </div>																
3																			
4																			
5																			
6																			
7			<div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 10px;">  </div> <div style="background-color: #f0f0f0; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p>Calibração nº. <input type="text"/></p> <p>Equipamento: CAUDALÍMETRO</p> <p>Marca: <input type="text"/></p> <p>Modelo: <input type="text"/></p> <p>Nº Serie: <input type="text"/></p> <p>Nº Ident. <input type="text"/></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Empresa: <input type="text"/></p> <p>Endereço: <input type="text"/></p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Temperatura (°C): <input type="text"/></p> <p>Humidade (%): <input type="text"/></p> <p>Pressão atm.(mbar): <input type="text"/></p> <p>Data de Serviço: <input type="text"/></p> </div> </div>																
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36																			
37																			
38																			
39																			
40																			
41																			
42																			
43																			
44																			
45																			
46																			
47																			
48																			
49																			
50																			
51																			
52																			
53																			
54																			
55																			
56																			
57																			
58																			

Figura B.1 – Matriz de calibração em *Excel* (menu de identificação)

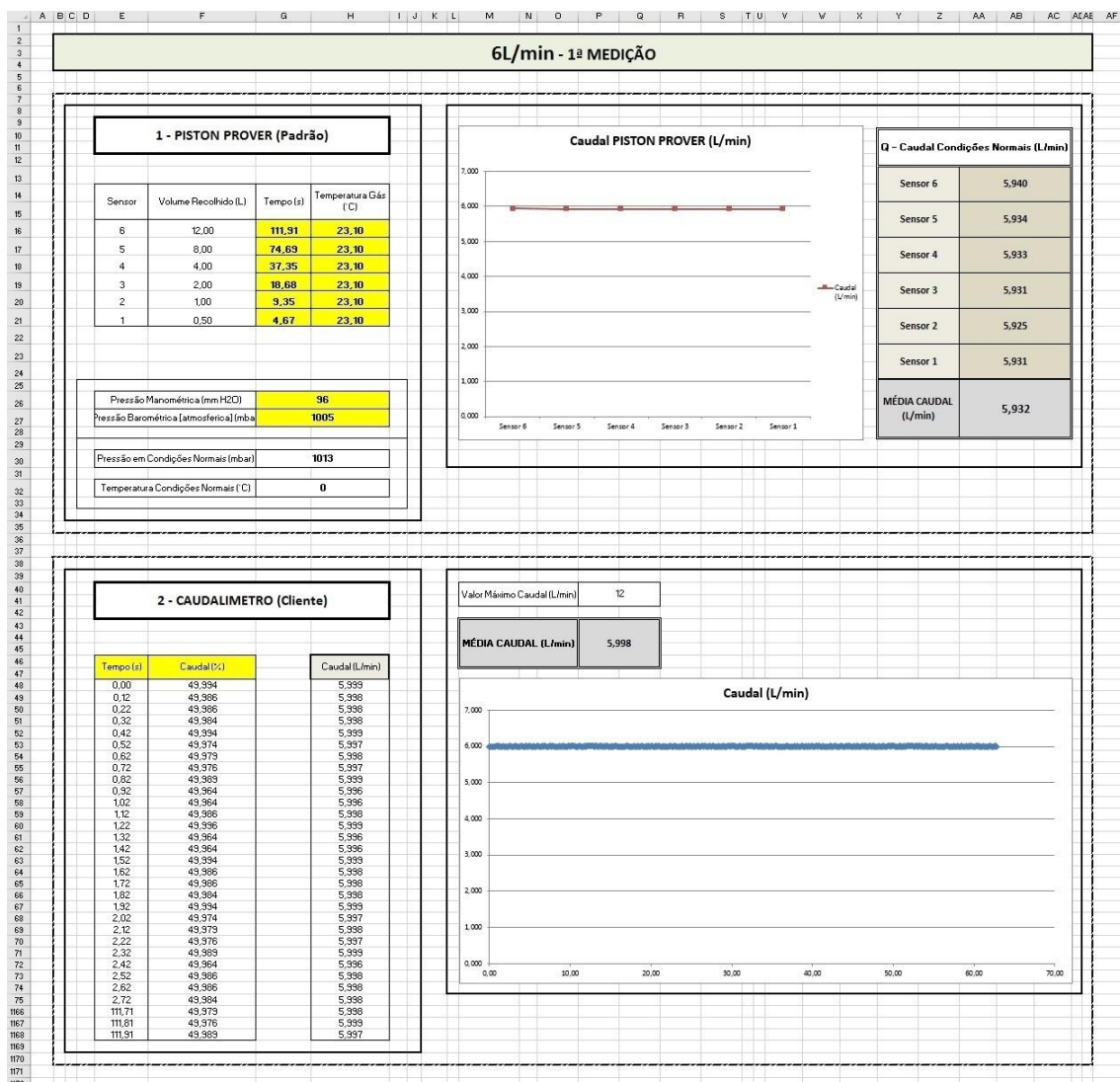


Figura B.2 – Matriz de calibração em *Excel* (caudal de 6L/min – 1ª medição)

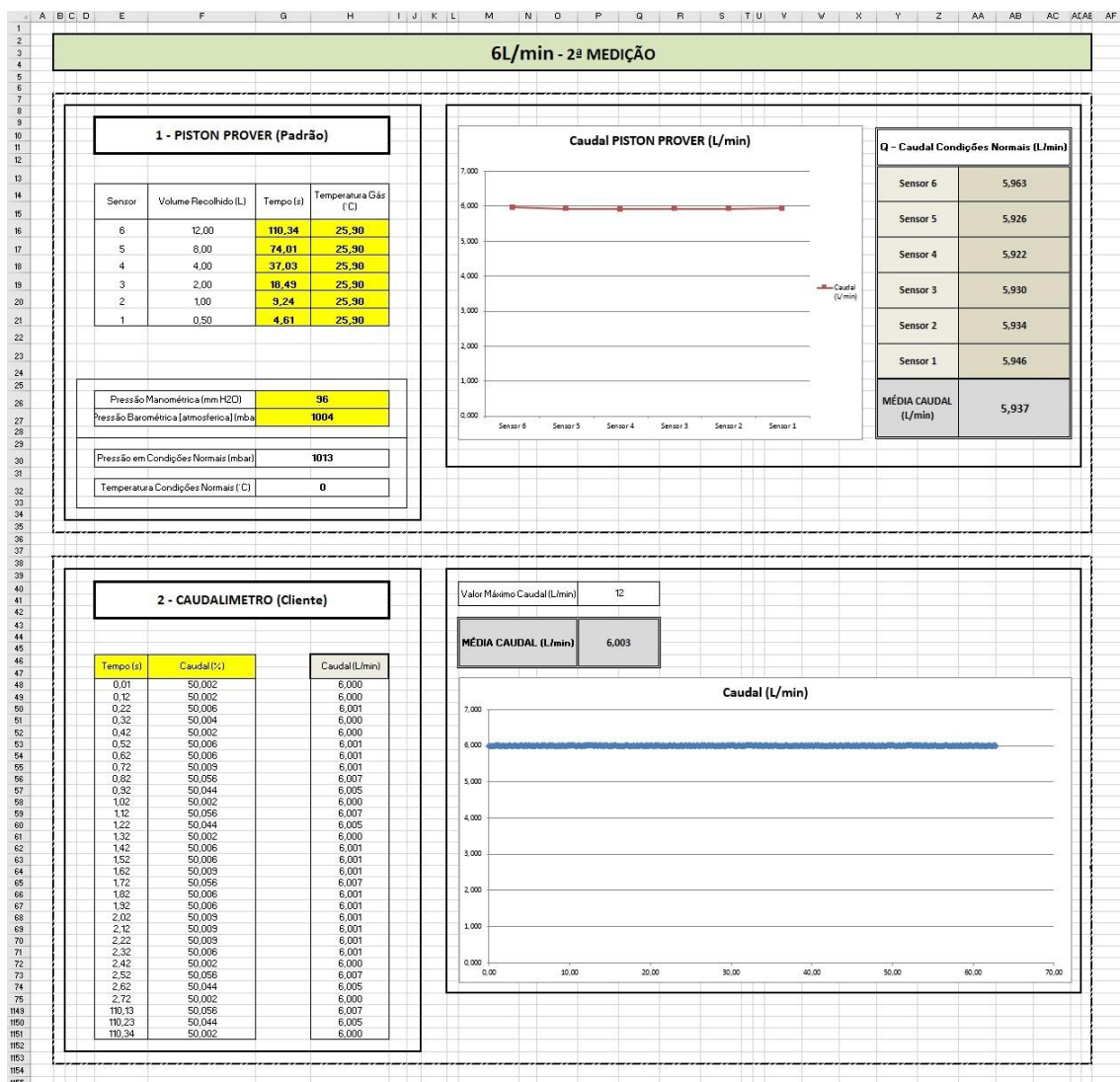


Figura B.3 – Matriz de calibração em Excel (caudal de 6L/min – 2ª medição)

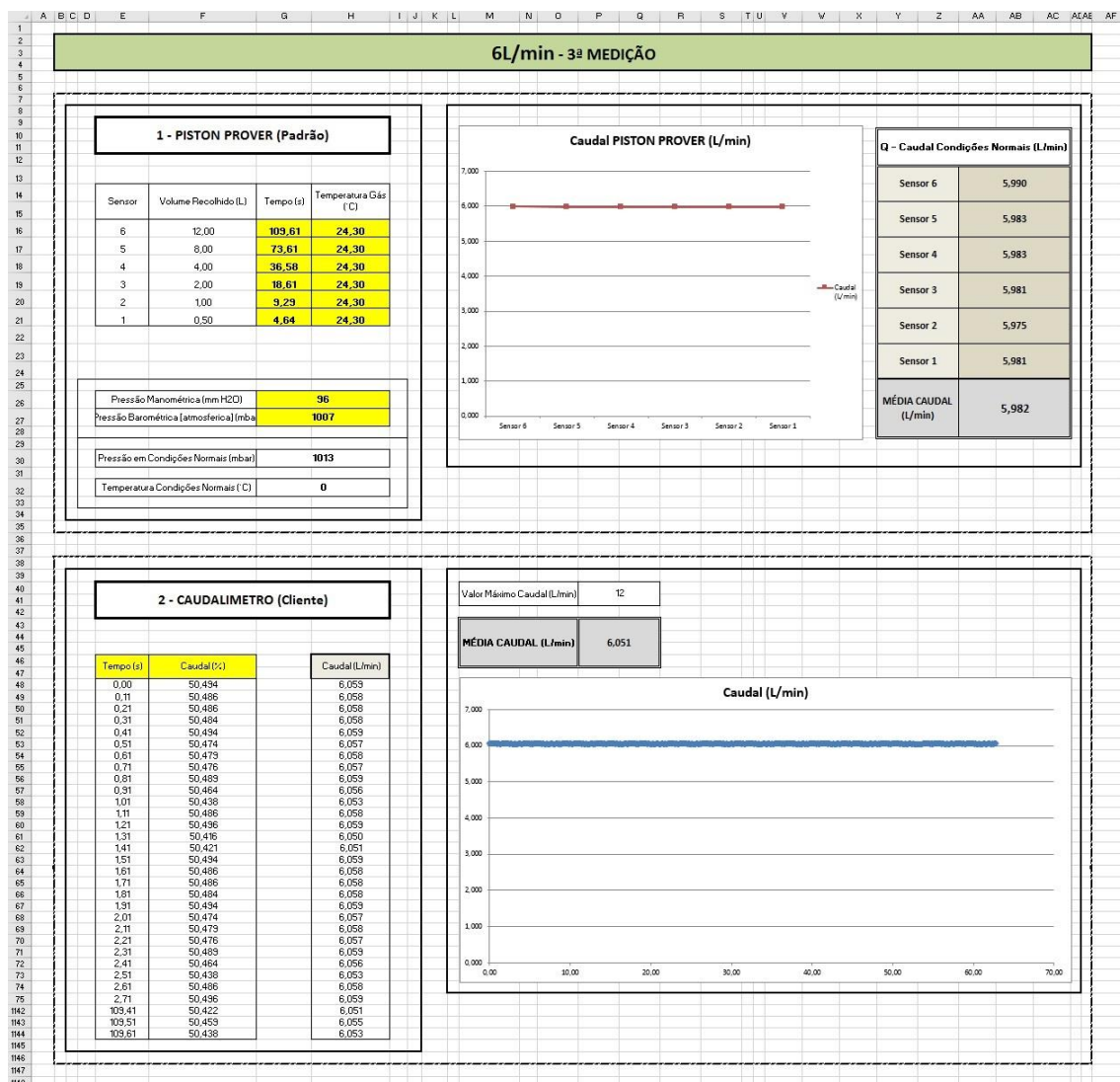


Figura B.4 – Matriz de calibração em Excel (caudal de 6L/min – 3ª medição)

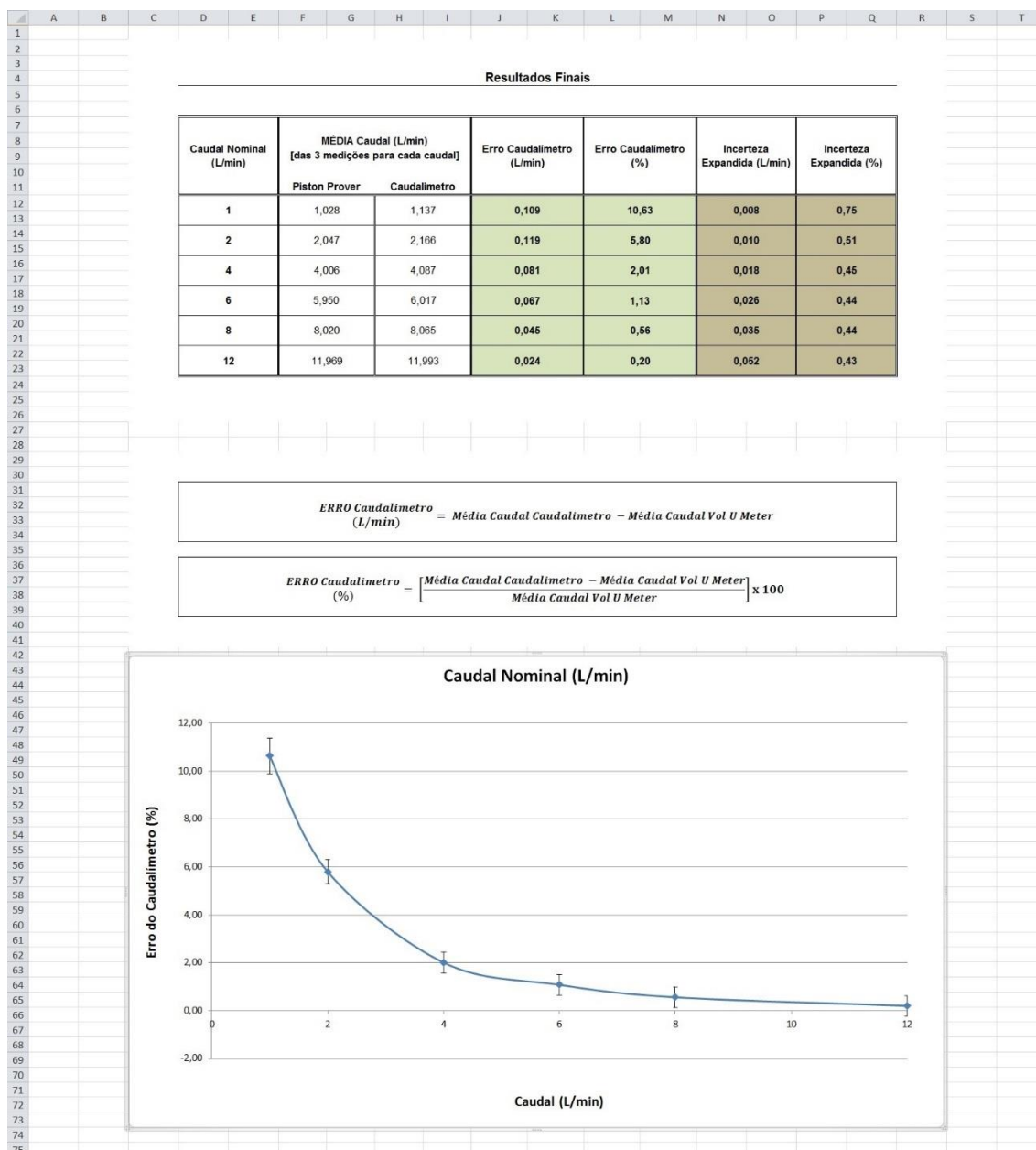


Figura B.5 – Matriz de calibração em *Excel* (resultados finais da calibração)

Anexo C – Tabelas e Gráficos de valores obtidos

Anexo C.1 – Tabelas e Gráficos da Estabilidade do Padrão

Tabela C.1.1 – Estabilidade do padrão - 05 de junho de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	1,035	1,024	1,022	1,027	1,030	1,037	0,004
2	2,002	1,989	1,986	1,995	1,995	1,999	0,009
4	4,029	3,988	3,989	4,007	4,008	4,015	0,017
6	5,968	5,949	5,987	5,880	5,933	6,042	0,026
8	8,084	8,013	8,007	8,045	8,036	8,053	0,034
12	12,043	11,939	11,927	11,971	11,955	11,982	0,052

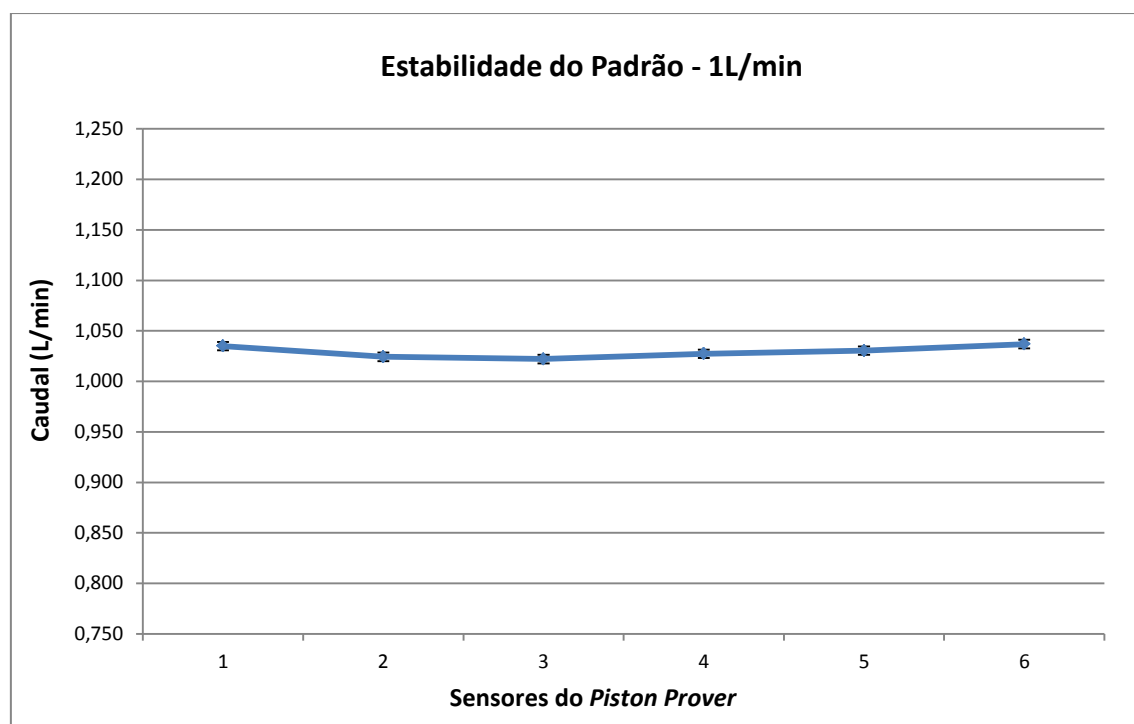


Gráfico C.1.1 – Estabilidade do padrão 1L/min - 05 de junho de 2015

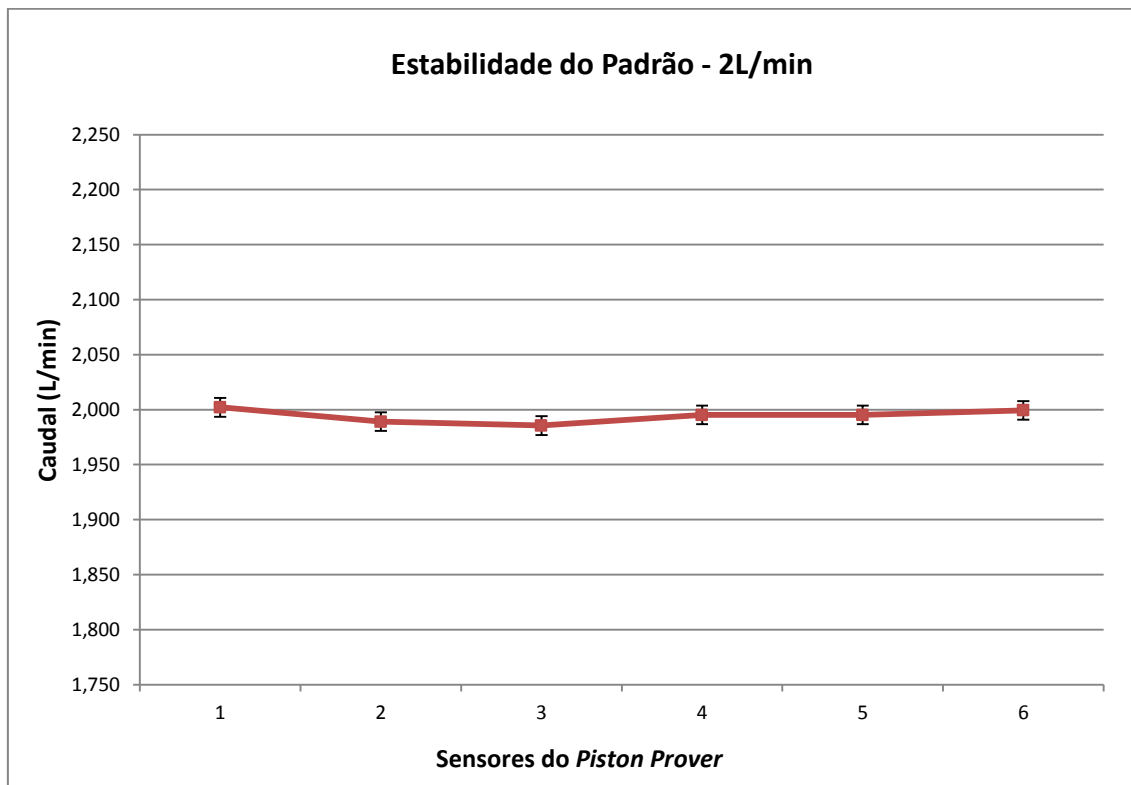


Gráfico C.1.2 – Estabilidade do padrão 2L/min - 05 de junho de 2015

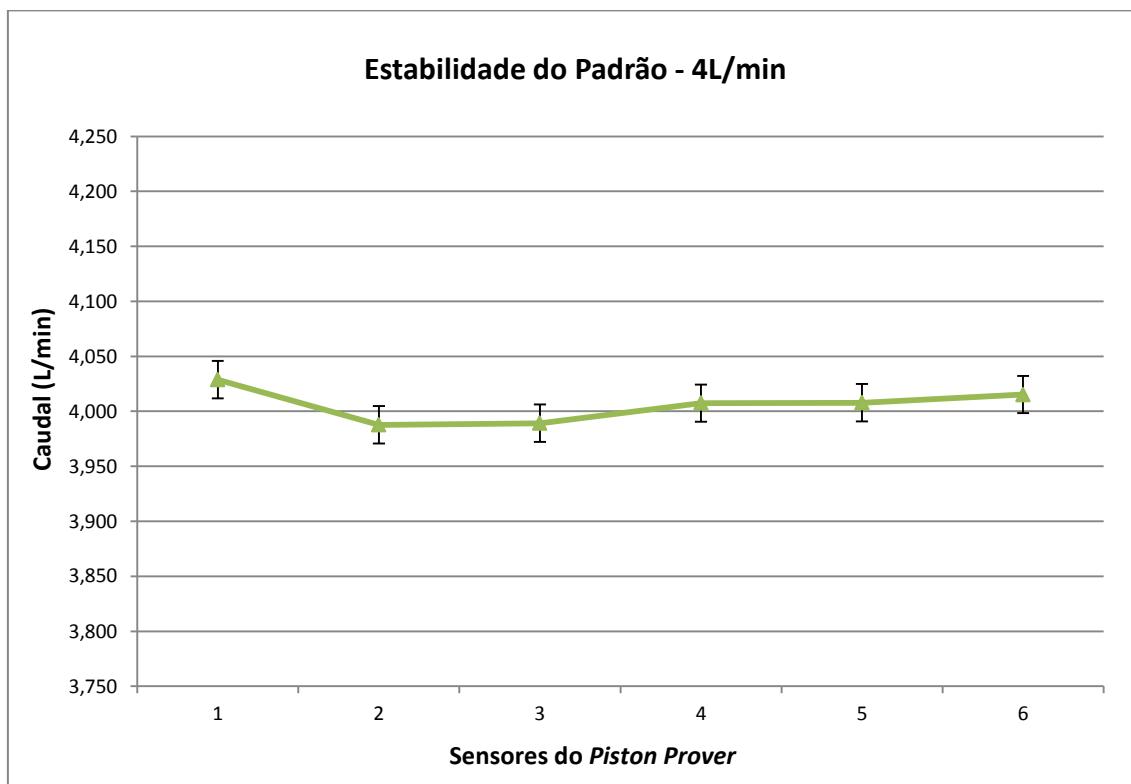


Gráfico C.1.3 – Estabilidade do padrão 4L/min - 05 de junho de 2015

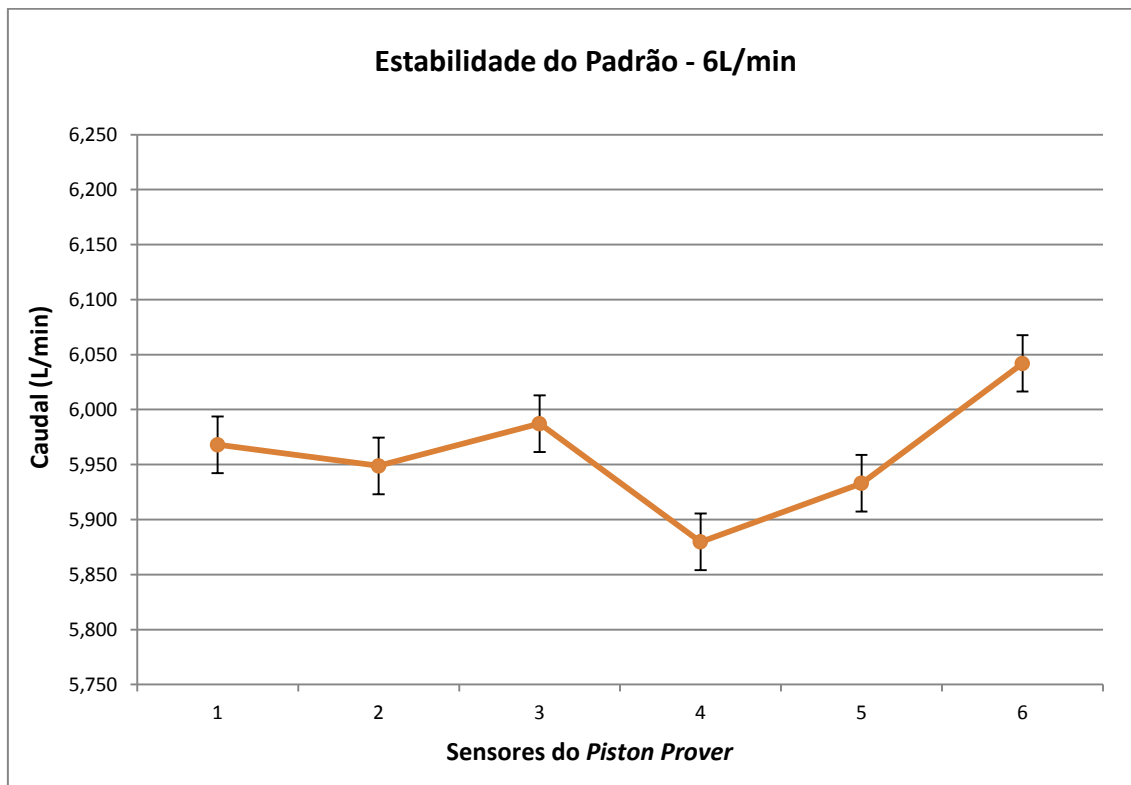


Gráfico C.1.4 – Estabilidade do padrão 6L/min - 05 de junho de 2015

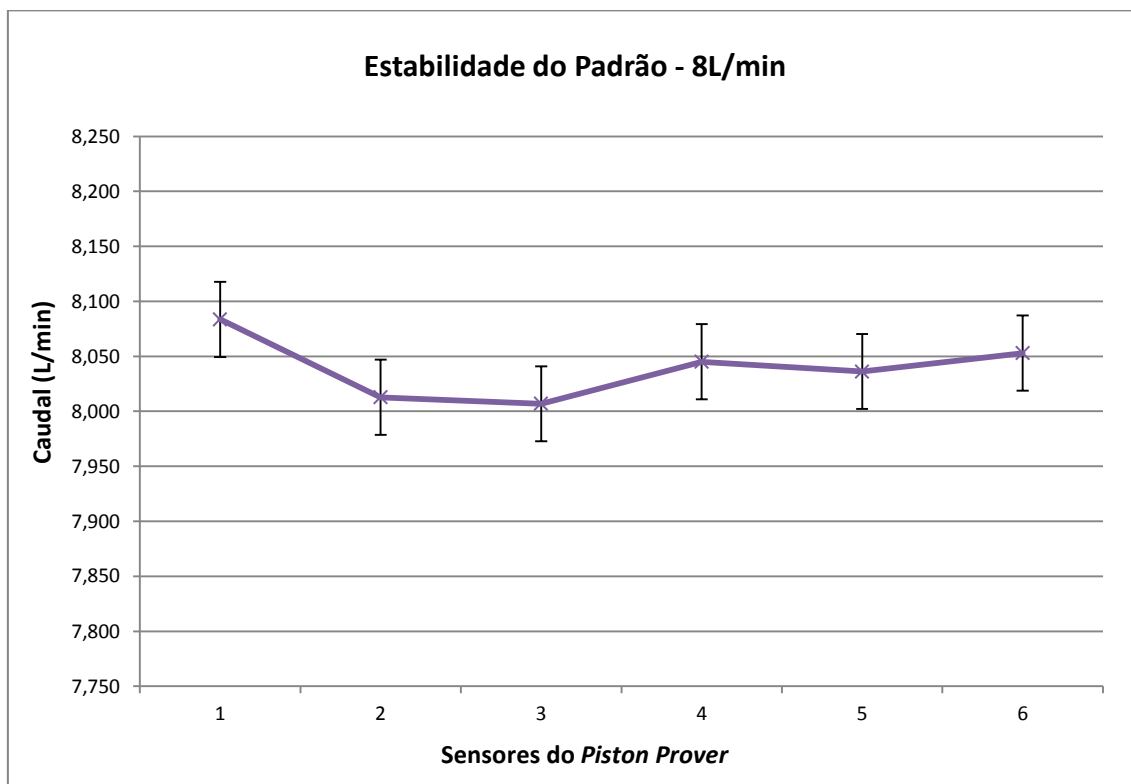


Gráfico C.1.5 – Estabilidade do padrão 8L/min - 05 de junho de 2015

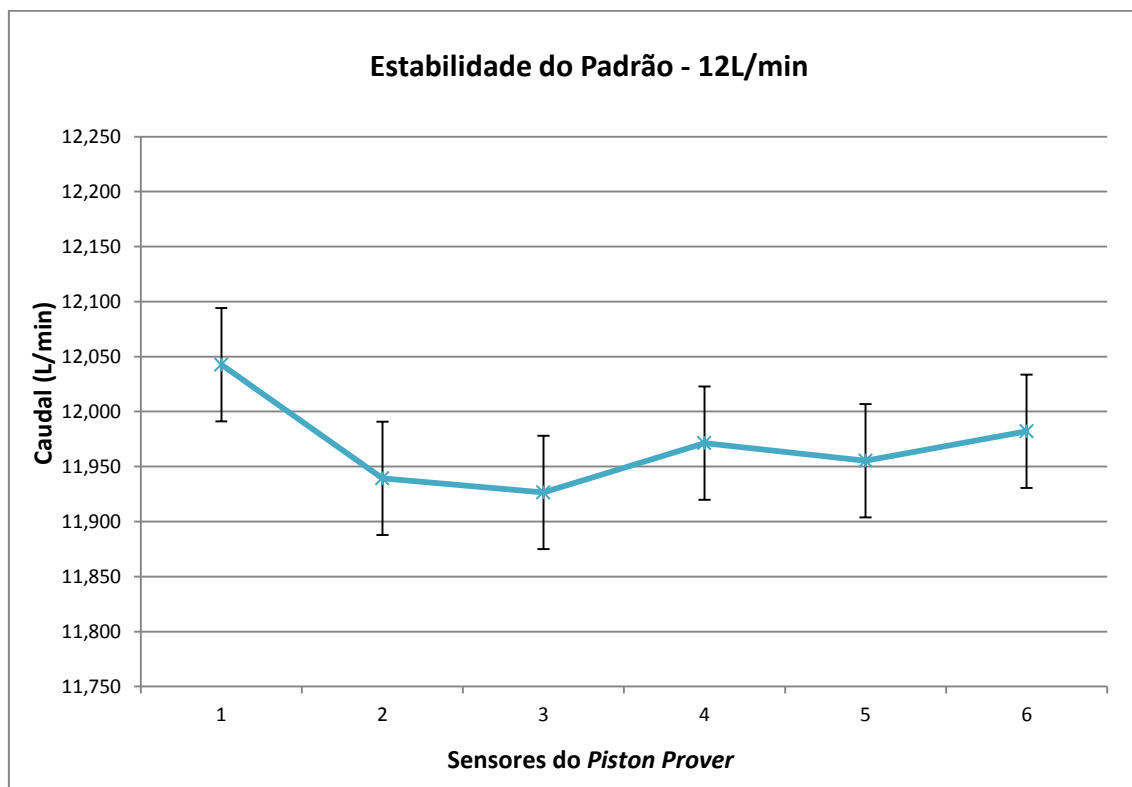


Gráfico C.1.6 – Estabilidade do padrão 12L/min - 05 de junho de 2015

Tabela C.1.2 – Estabilidade do padrão - 26 de agosto de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	0,990	0,981	0,982	0,979	0,983	0,974	0,004
2	2,068	2,065	2,062	2,063	2,048	2,071	0,009
4	4,001	3,961	3,961	3,972	3,962	3,966	0,017
6	5,999	5,992	5,999	6,000	6,009	6,005	0,026
8	8,114	8,044	8,056	8,085	8,077	8,095	0,034
12	11,975	11,873	11,873	11,924	11,908	11,932	0,052

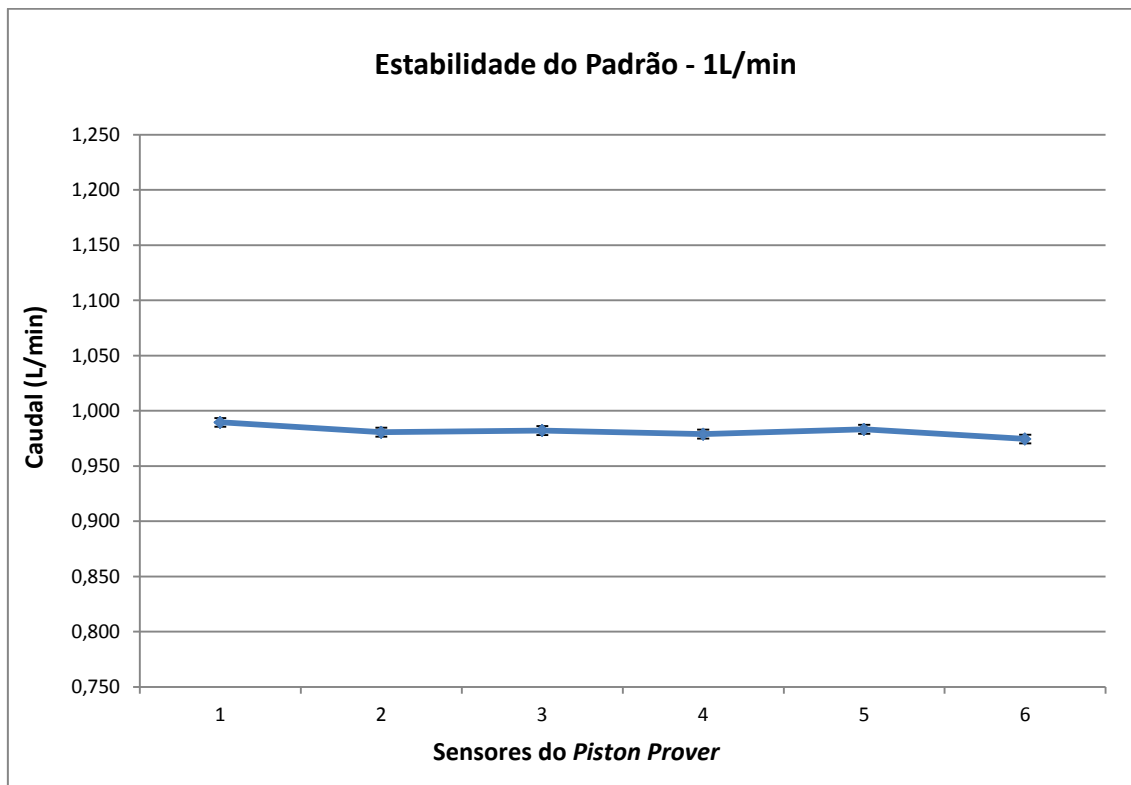


Gráfico C.1.7 – Estabilidade do padrão 1L/min - 26 de agosto de 2015

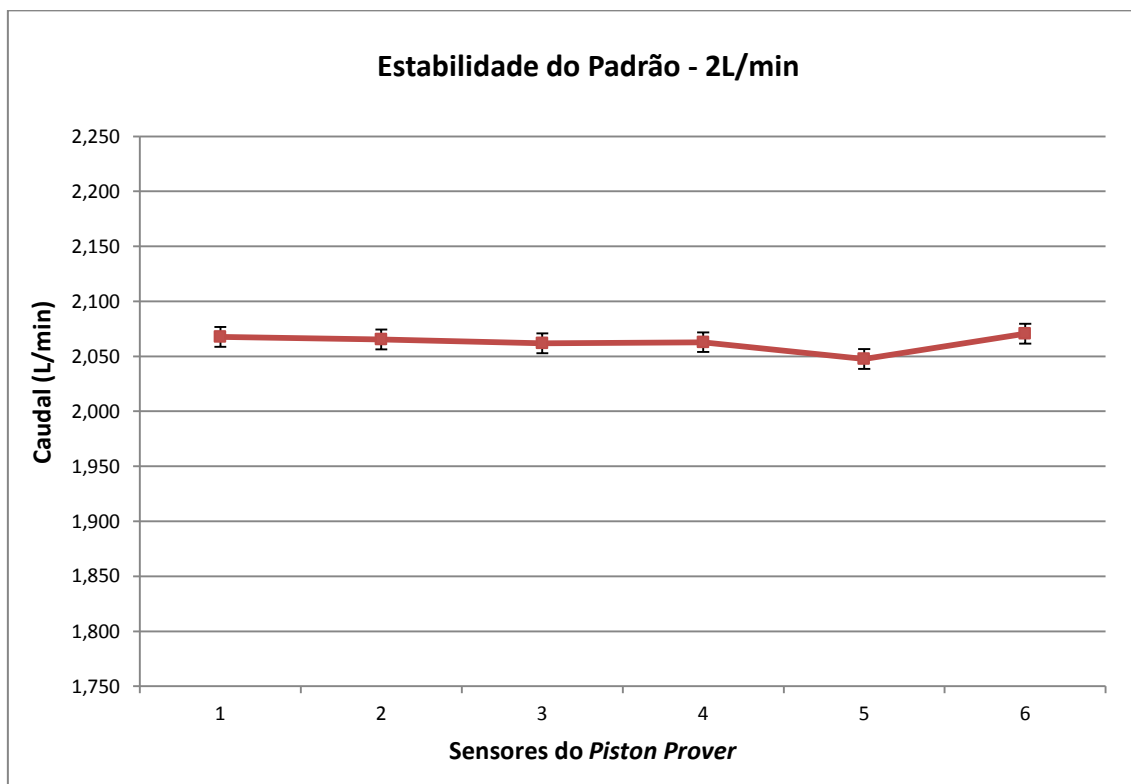


Gráfico C.1.8 – Estabilidade do padrão 2L/min - 26 de agosto de 2015

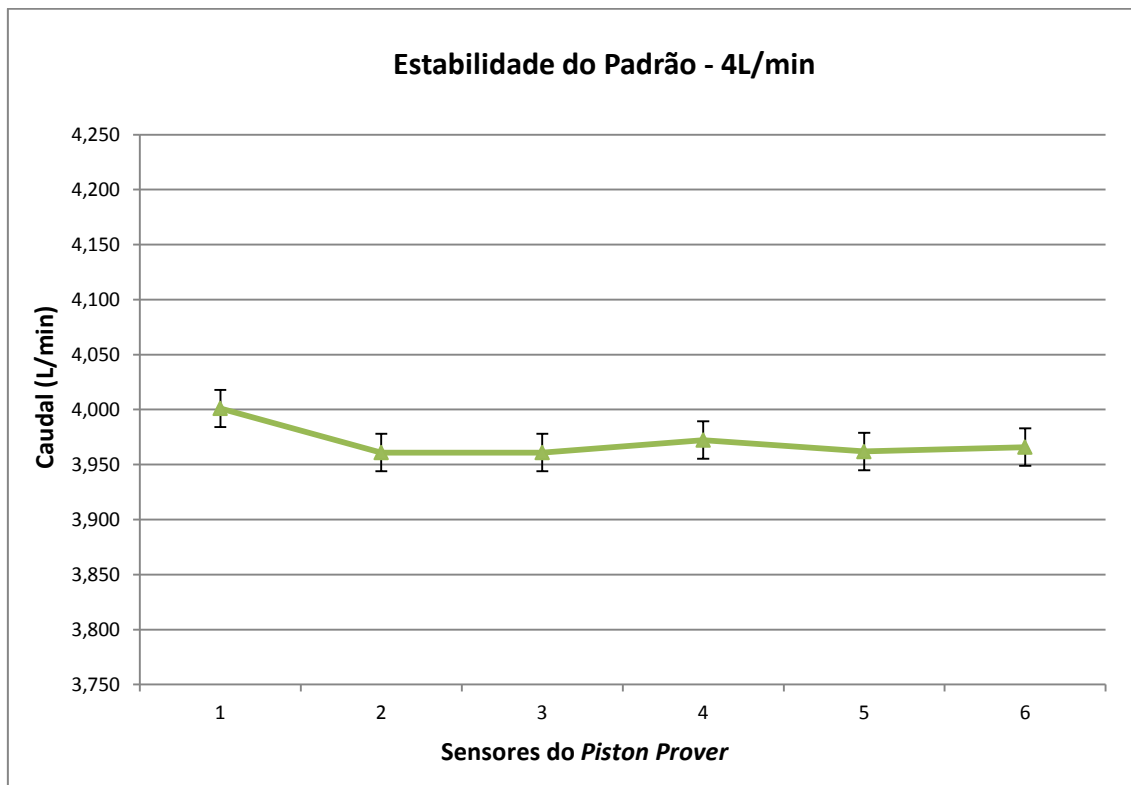


Gráfico C.1.9 – Estabilidade do padrão 4L/min - 26 de agosto de 2015

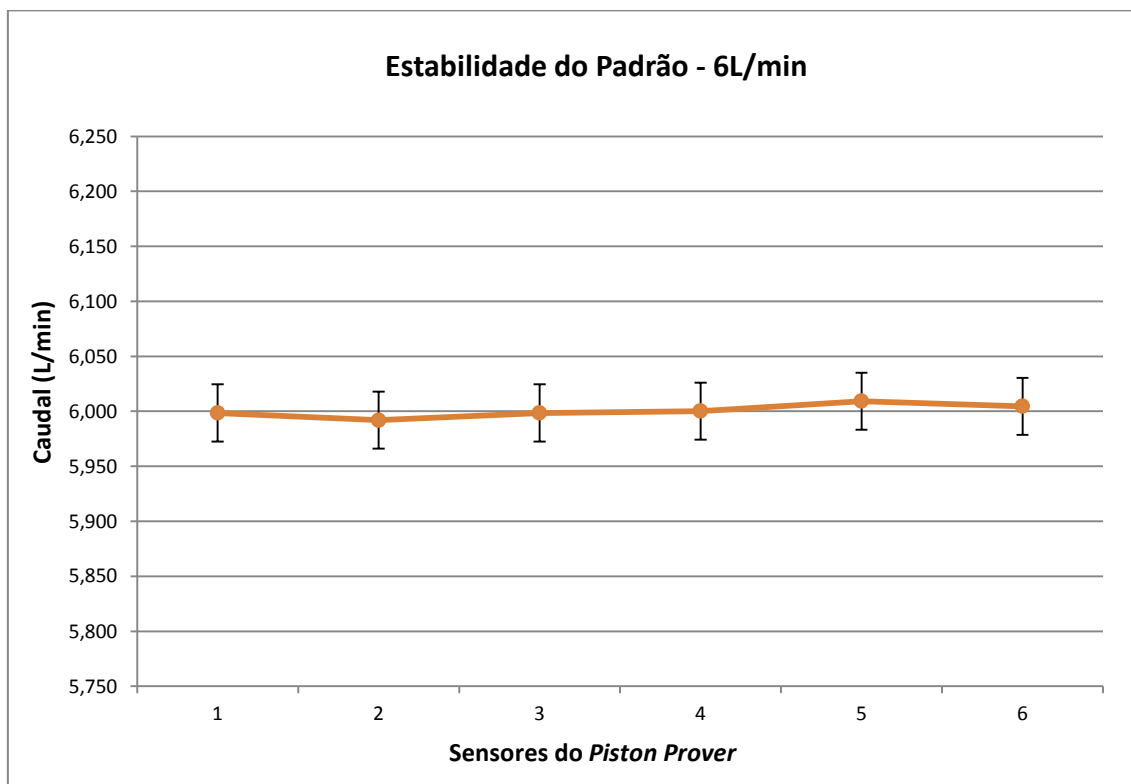


Gráfico C.1.10 – Estabilidade do padrão 6L/min - 26 de agosto de 2015

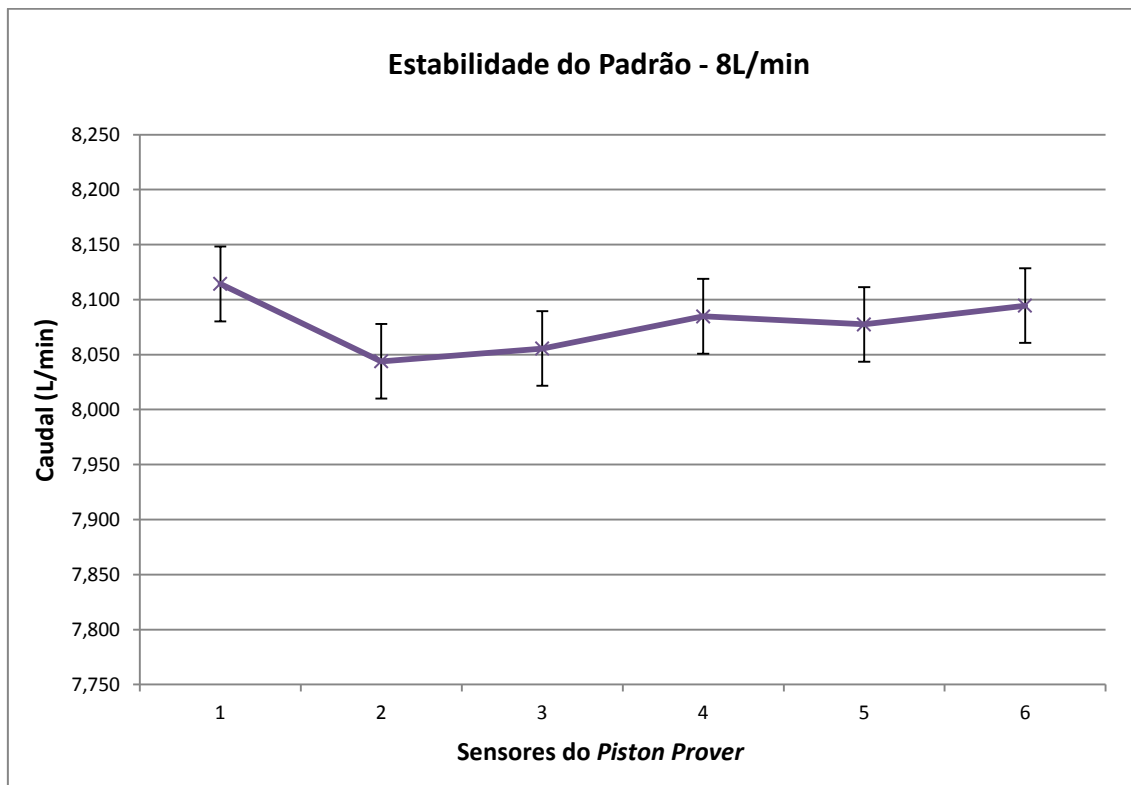


Gráfico C.1.11 – Estabilidade do padrão 8L/min - 26 de agosto de 2015

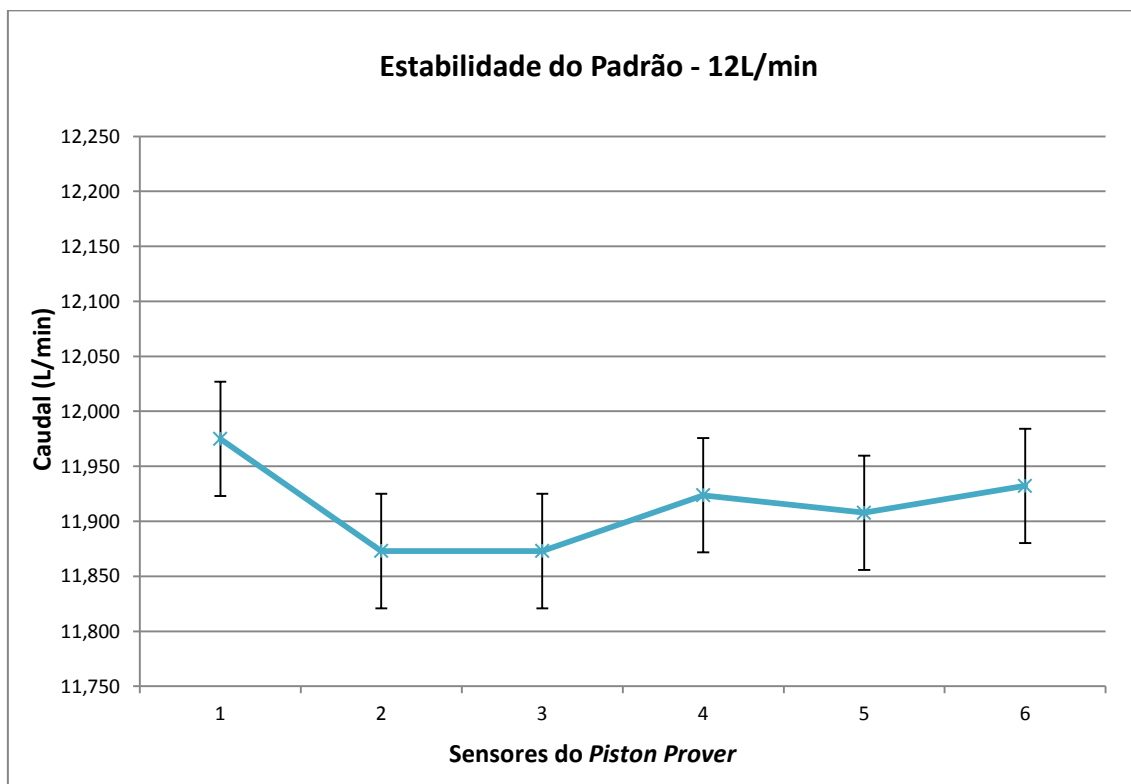


Gráfico C.1.12 – Estabilidade do padrão 12L/min - 26 de agosto de 2015

Tabela C.1.3 – Estabilidade do padrão - 28 de outubro de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	1,035	1,027	1,023	1,024	1,020	1,023	0,004
2	1,926	1,909	1,902	1,908	1,908	1,911	0,009
4	4,030	3,989	3,991	4,009	4,009	4,017	0,017
6	6,011	5,998	5,985	5,990	5,995	6,024	0,026
8	8,084	8,013	8,008	8,046	8,037	8,054	0,034
12	12,074	11,969	11,982	12,028	12,018	12,008	0,052

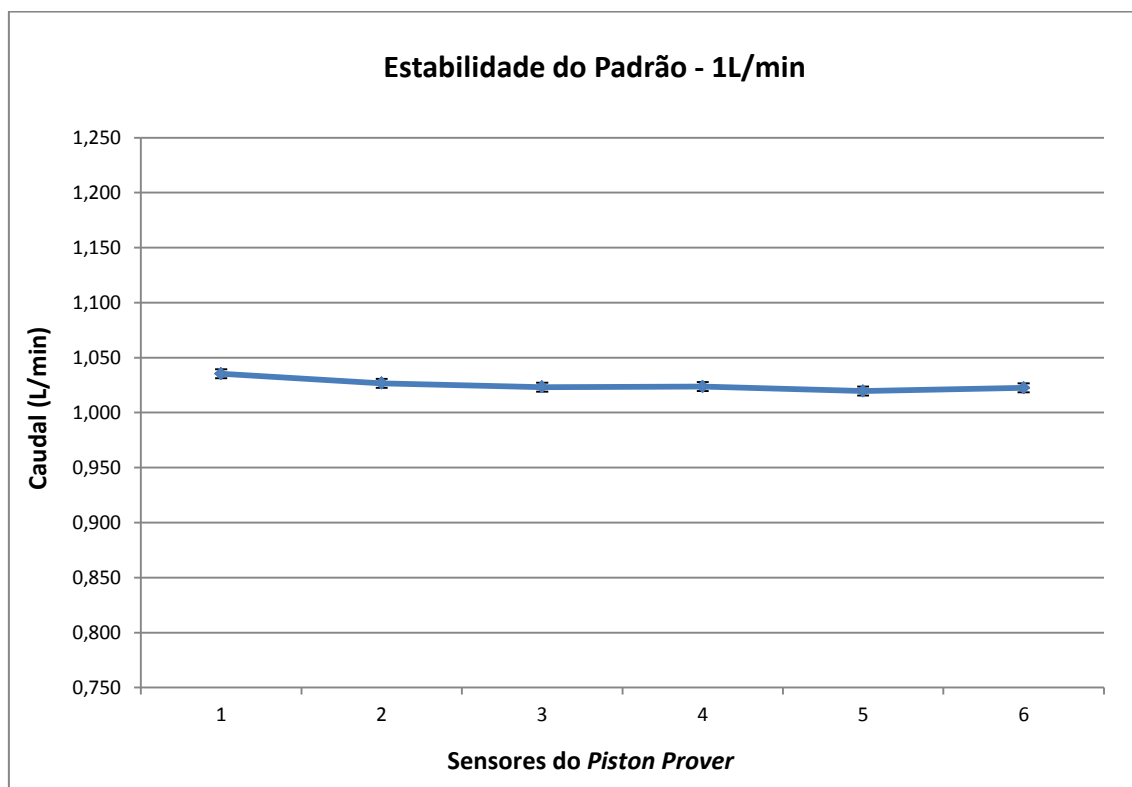


Gráfico C.1.13 – Estabilidade do padrão 1L/min - 28 de outubro de 2015

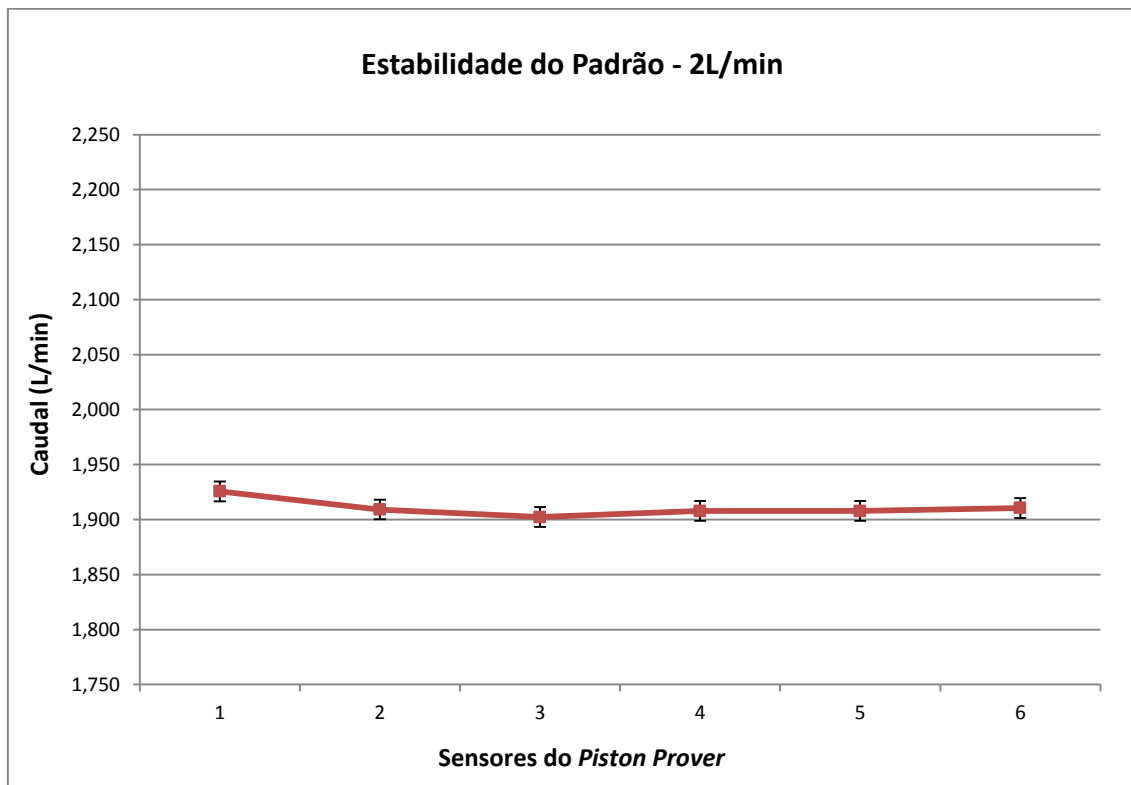


Gráfico C.1.14 – Estabilidade do padrão 2L/min - 28 de outubro de 2015

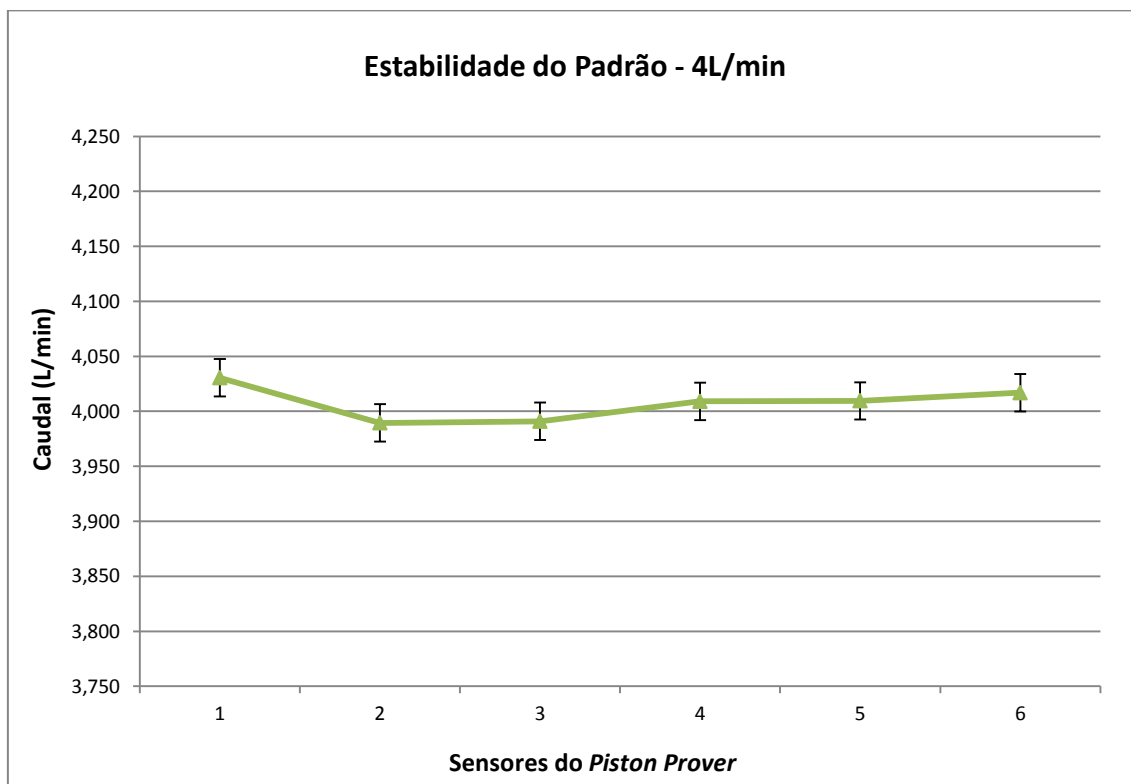


Gráfico C.1.15 – Estabilidade do padrão 4L/min - 28 de outubro de 2015

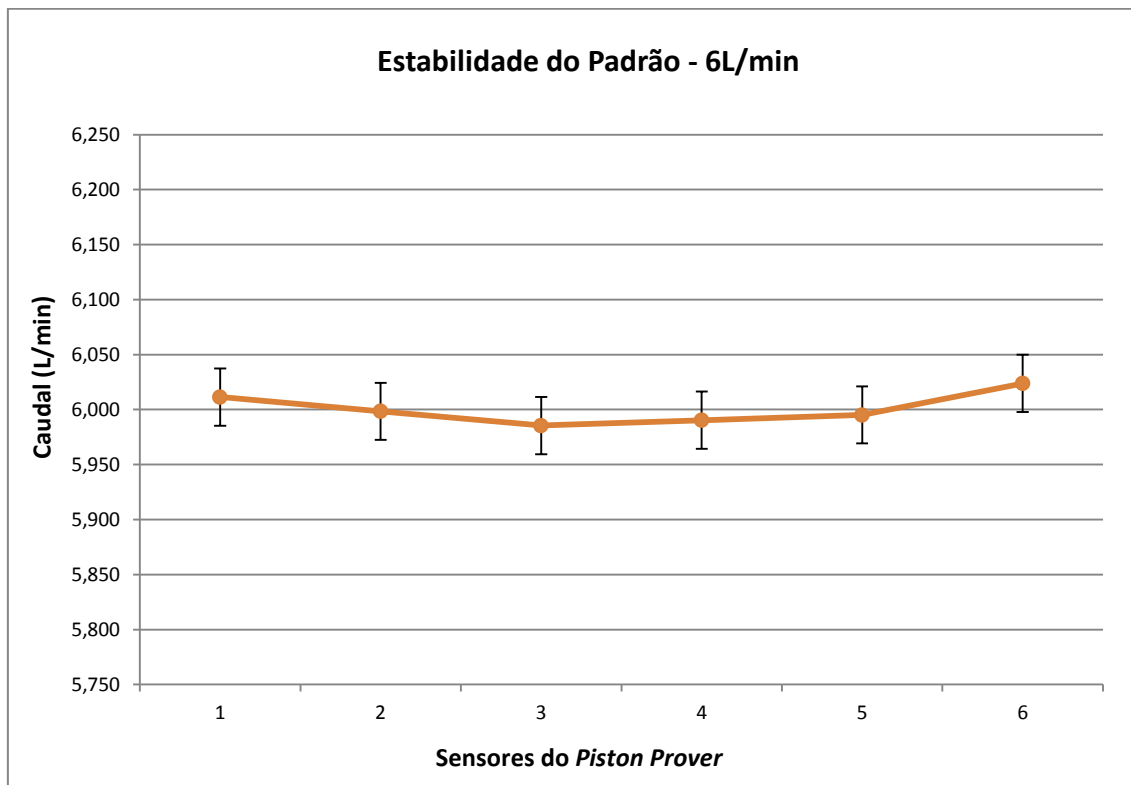


Gráfico C.1.16 – Estabilidade do padrão 6L/min - 28 de outubro de 2015

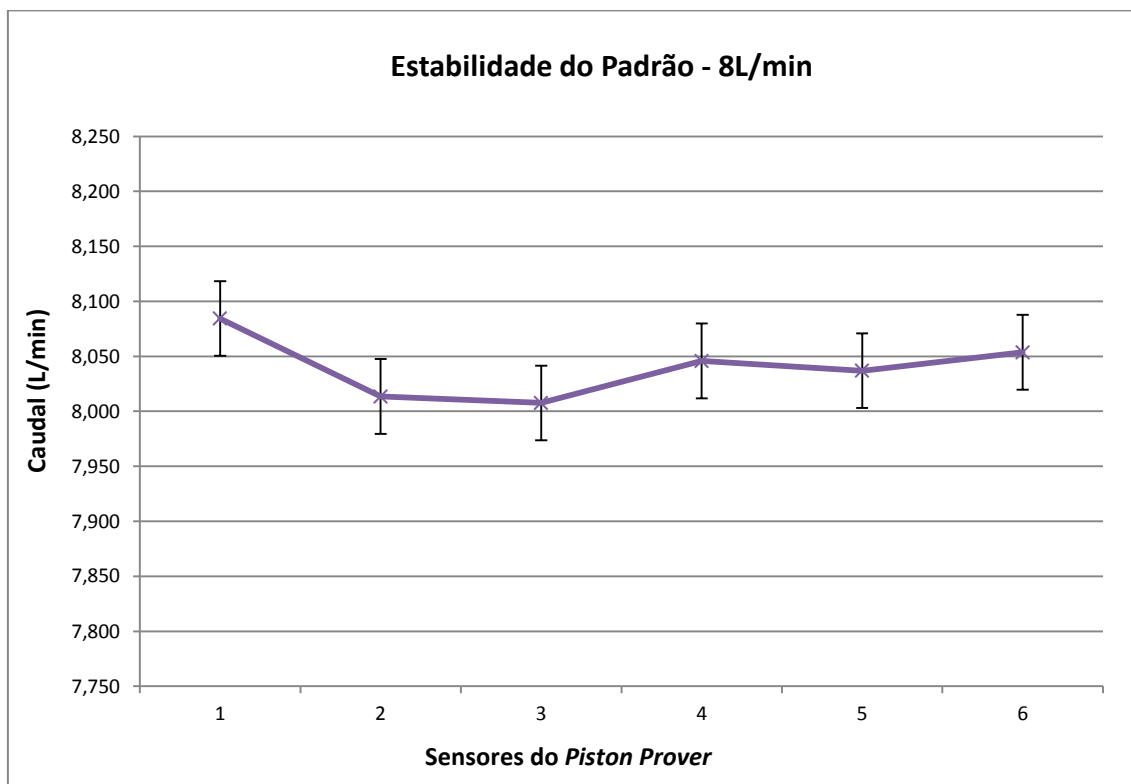


Gráfico C.1.17 – Estabilidade do padrão 8L/min - 28 de outubro de 2015

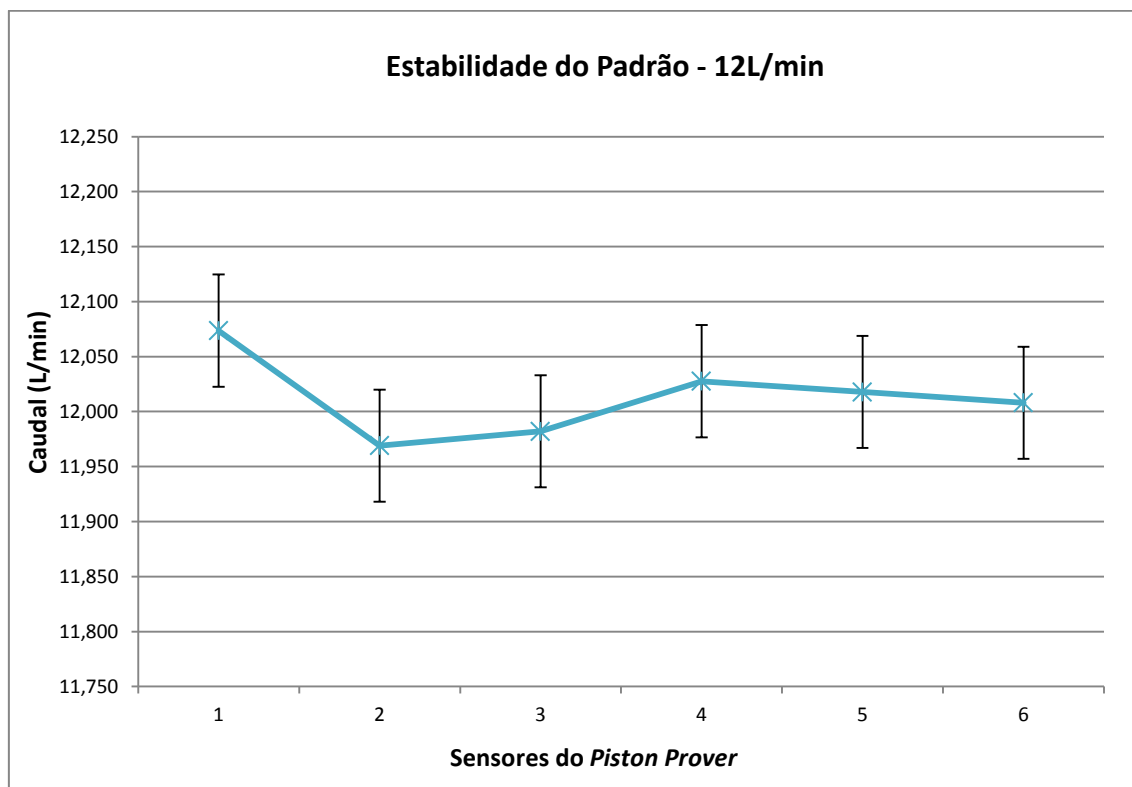


Gráfico C.1.18 – Estabilidade do padrão 12L/min - 28 de outubro de 2015

Tabela C.1.4 – Estabilidade do padrão - 30 de dezembro de 2015

Caudais (L/min)	Valores medidos nos sensores (L/min)						Incerteza Expandida (L/min)
	1º Sensor	2º Sensor	3º Sensor	4º Sensor	5º Sensor	6º Sensor	
1	1,055	1,046	1,046	1,052	1,057	1,063	0,004
2	1,985	1,966	1,963	1,967	1,961	1,963	0,009
4	4,029	4,003	3,991	4,008	4,006	4,019	0,017
6	5,962	5,968	5,978	5,977	5,974	5,987	0,026
8	8,096	8,026	8,026	8,055	8,048	8,065	0,034
12	12,015	11,964	11,951	11,977	11,938	12,037	0,052

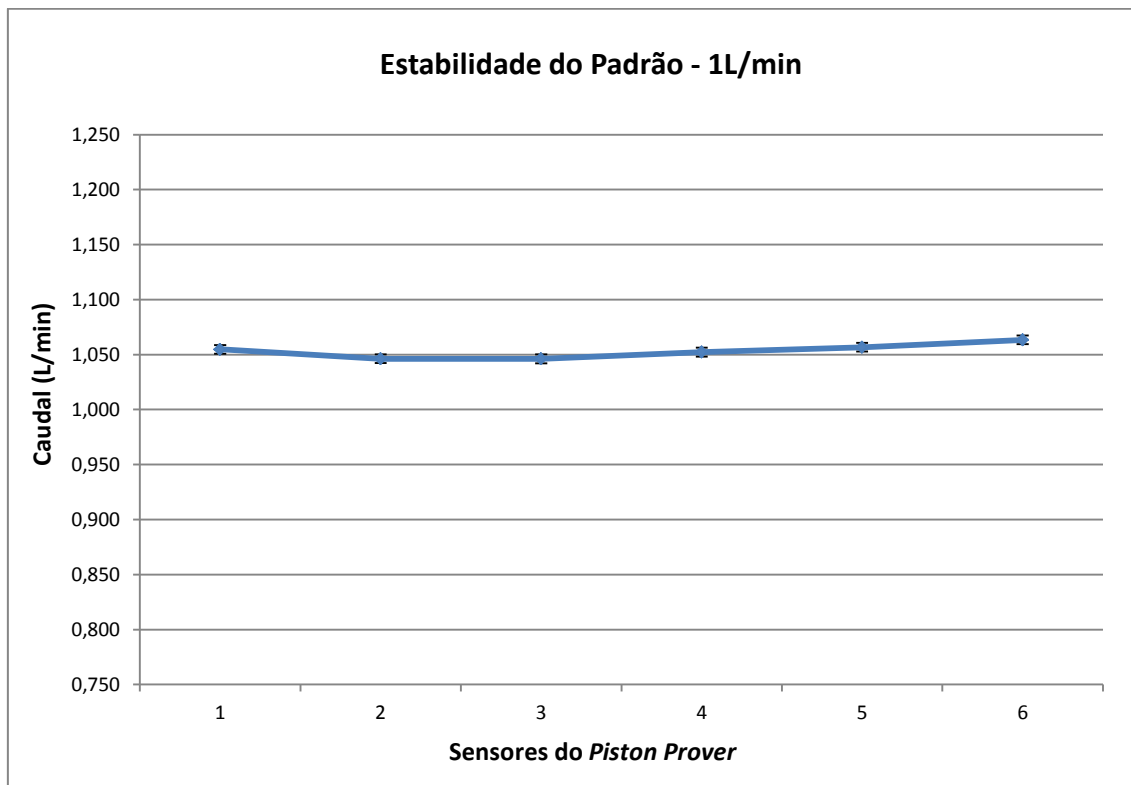


Gráfico C.1.19 – Estabilidade do padrão 1L/min - 30 de dezembro de 2015

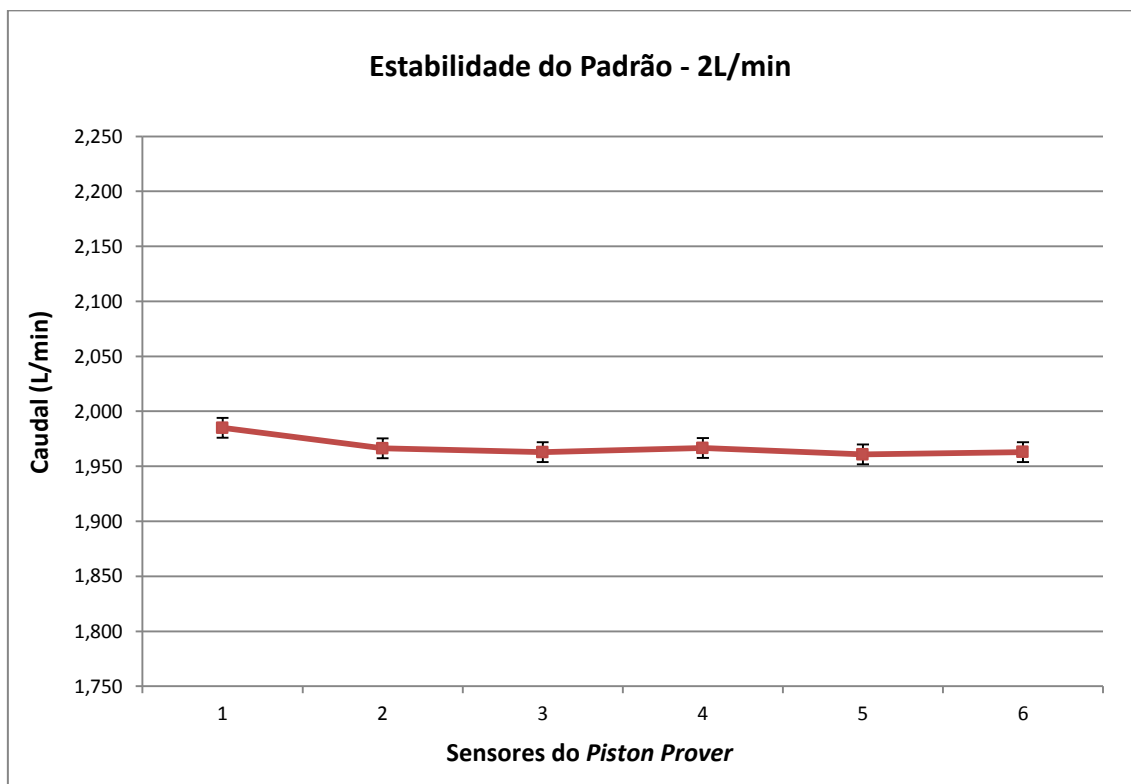


Gráfico C.1.20 – Estabilidade do padrão 2L/min - 30 de dezembro de 2015

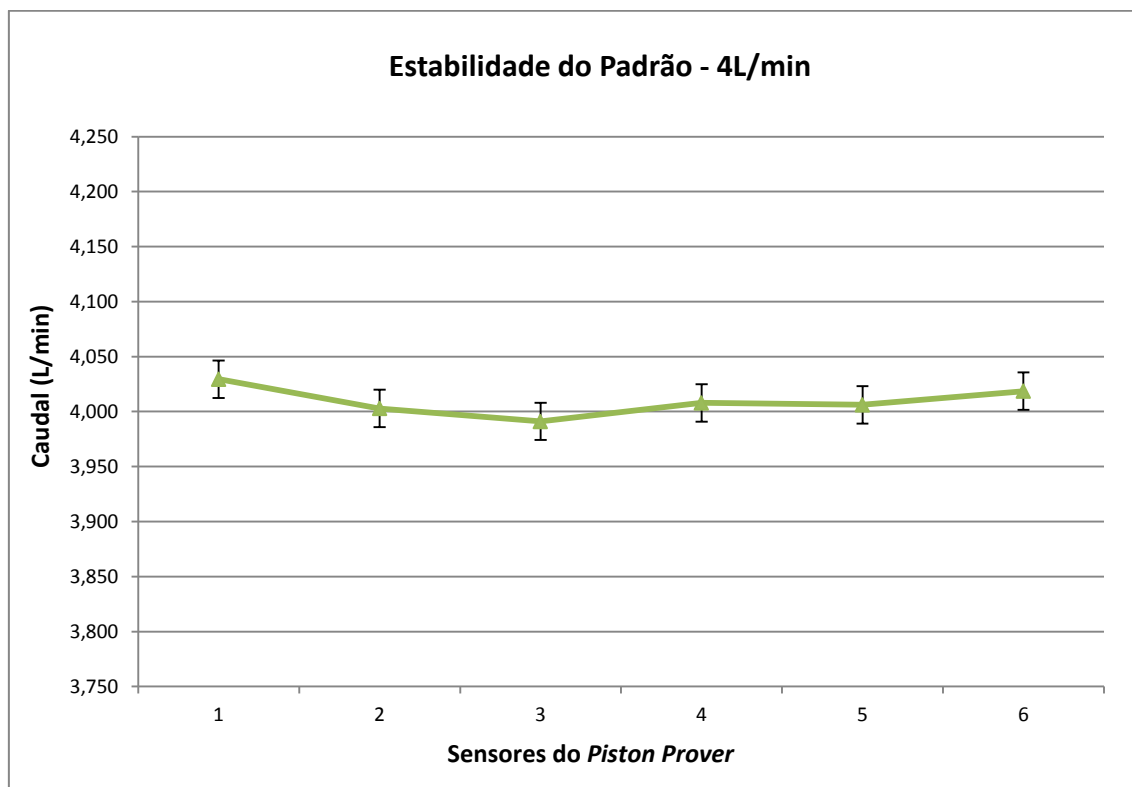


Gráfico C.1.21 – Estabilidade do padrão 4L/min - 30 de dezembro de 2015

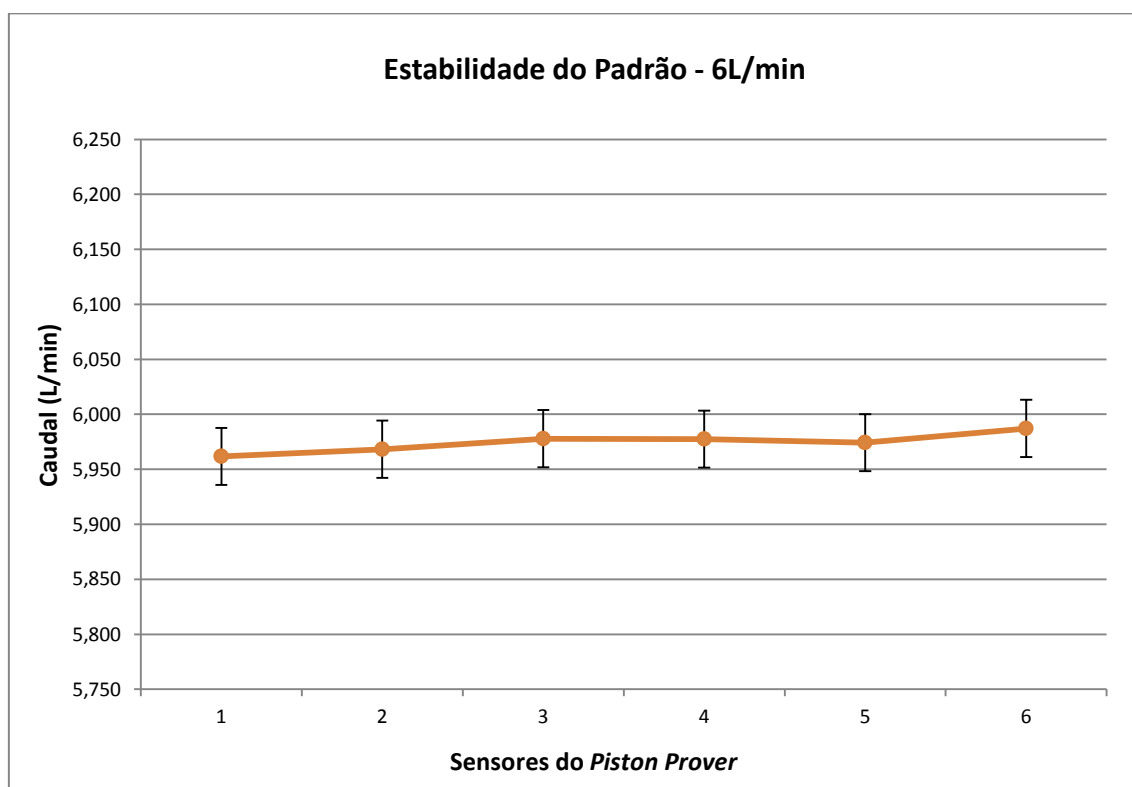


Gráfico C.1.22 – Estabilidade do padrão 6L/min - 30 de dezembro de 2015

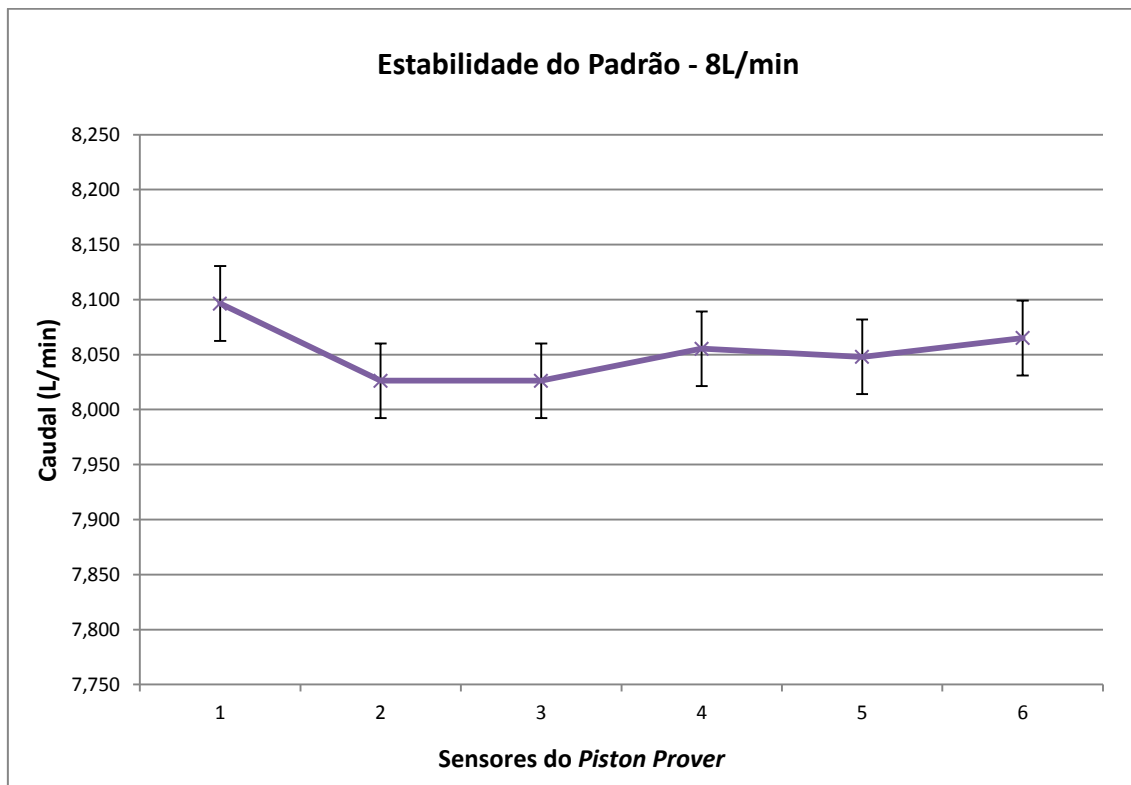


Gráfico C.1.23 – Estabilidade do padrão 8L/min - 30 de dezembro de 2015

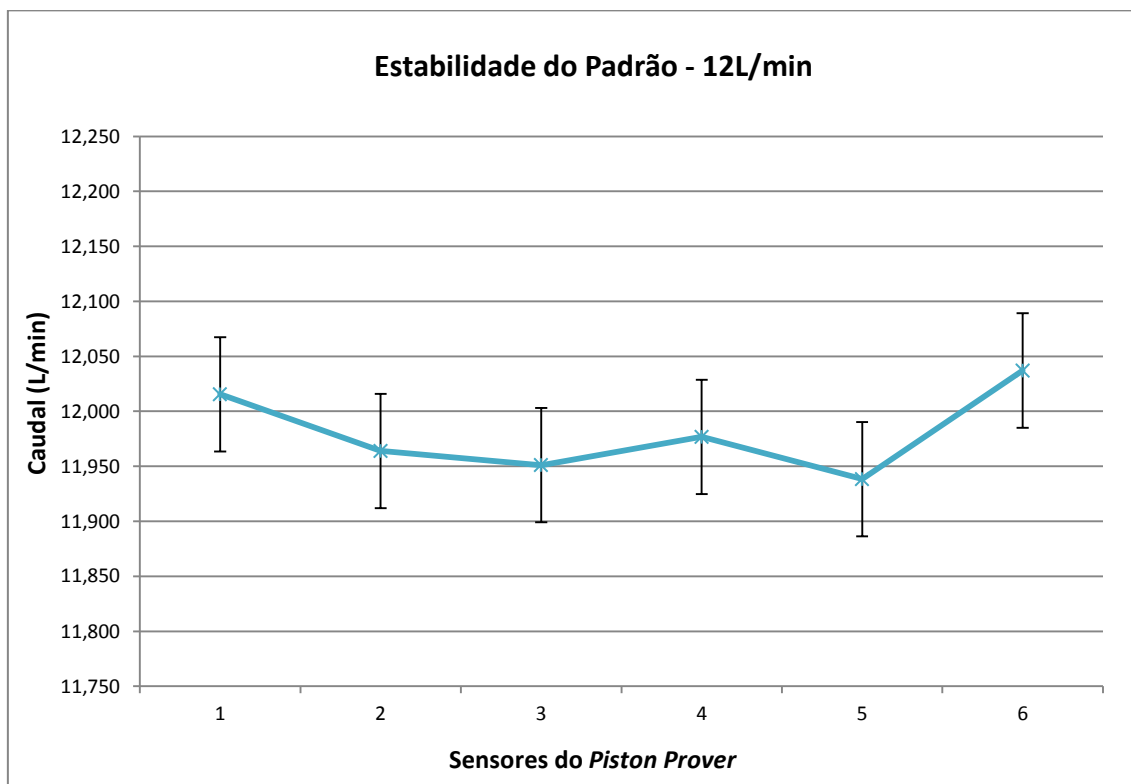


Gráfico C.1.24 – Estabilidade do padrão 12L/min - 30 de dezembro de 2015

Anexo C.2 – Tabelas dos erros médios nos ensaios efetuados

As seguintes tabelas e gráficos apresentam o erro médio final, calculado para cada caudal.

Tabela C.2.1 – Erro médio do caudalímetro (L/min) para diferentes caudais

Erro Médio do Caudalímetro (L/min)		1 L/min	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min	12 L/min
Junho	01 Junho	0,094	0,114	0,080	0,067	0,044	0,030
	03 Junho	0,101	0,108	0,080	0,065	0,042	0,032
	05 Junho	0,099	0,112	0,081	0,066	0,044	0,031
Agosto	26 Agosto	0,103	0,106	0,083	0,066	0,041	0,033
	27 Agosto	0,103	0,108	0,083	0,067	0,043	0,028
	28 Agosto	0,102	0,105	0,083	0,065	0,043	0,037
Outubro	26 Outubro	0,103	0,111	0,081	0,066	0,043	0,031
	28 Outubro	0,102	0,109	0,081	0,068	0,044	0,030
	30 Outubro	0,104	0,112	0,081	0,068	0,043	0,030
Dezembro	28 Dezembro	0,103	0,111	0,083	0,068	0,041	0,030
	29 Dezembro	0,103	0,109	0,082	0,068	0,043	0,031
	30 Dezembro	0,103	0,111	0,082	0,067	0,043	0,029
Erro Médio Final (L/min)		0,102	0,110	0,082	0,067	0,043	0,031

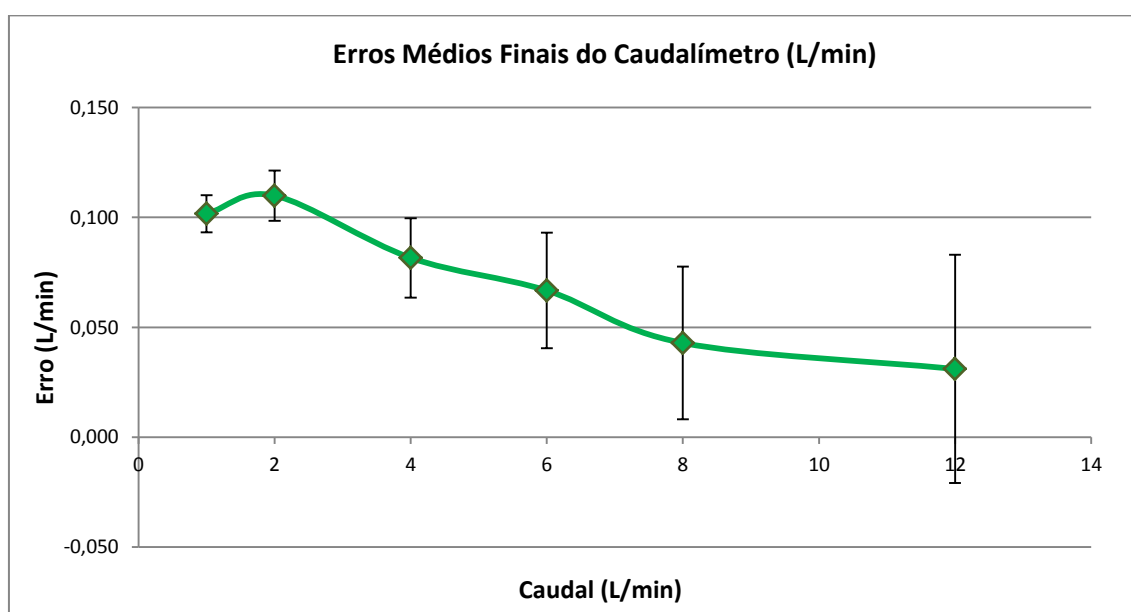


Gráfico C.2.2 – Erro médio final do caudalímetro (L/min)

Tabela C.2.2 – Erro médio do caudalímetro (%) para diferentes caudais

Erro Médio do Caudalímetro (%)		1 L/min	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min	12 L/min
Junho	01 Junho	9,52	5,72	2,01	1,13	0,55	0,25
	03 Junho	10,05	5,48	2,00	1,09	0,53	0,27
	05 Junho	9,88	5,68	2,02	1,11	0,54	0,26
Agosto	26 Agosto	10,42	5,32	2,09	1,10	0,51	0,28
	27 Agosto	10,49	5,42	2,09	1,12	0,53	0,24
	28 Agosto	10,19	5,28	2,10	1,09	0,53	0,31
Outubro	26 Outubro	10,51	5,54	2,03	1,10	0,53	0,26
	28 Outubro	9,89	5,58	2,02	1,13	0,55	0,25
	30 Outubro	10,54	5,62	2,03	1,14	0,53	0,25
Dezembro	28 Dezembro	10,54	5,59	2,09	1,14	0,51	0,25
	29 Dezembro	10,22	5,56	2,06	1,13	0,54	0,26
	30 Dezembro	10,22	5,55	2,05	1,12	0,53	0,25
Erro Médio Final (%)		10,21	5,53	2,05	1,12	0,53	0,26

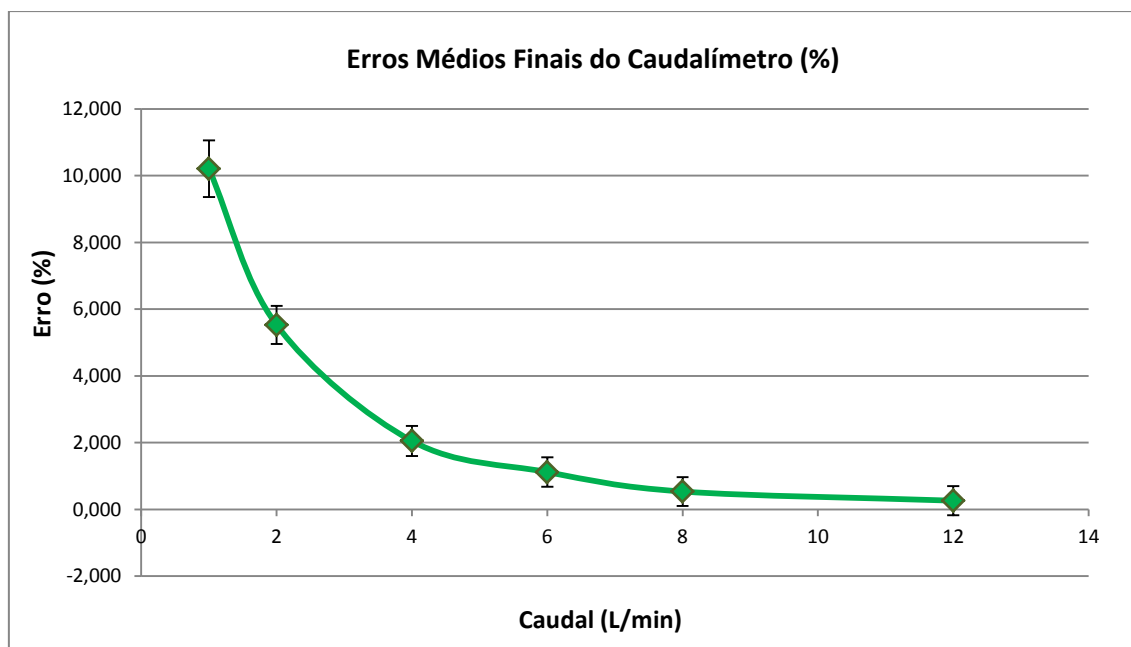


Gráfico C.2.2 – Erro médio final do caudalímetro (%)

Nas seguintes tabelas são apresentados todos os valores de caudal obtidos nos 432 ensaios efetuados ao sistema durante os diferentes meses em que os mesmos decorreram em 2015, tal como os respetivos erros associados.

Tabela C.2.3 – Resultado dos ensaios de caudal – 01-06-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,137	0,991	1,092	1,123	1,033	1,101
	Padrão (L/min)	1,028	0,914	1,001	1,034	0,937	1,001
	Erro (L/min)	0,109	0,077	0,091	0,089	0,096	0,100
	Erro (%)	10,63	8,44	9,05	8,66	10,27	10,00
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,166	2,107	2,074	2,162	2,118	2,080
	Padrão (L/min)	2,047	1,989	1,965	2,050	2,002	1,966
	Erro (L/min)	0,119	0,118	0,108	0,112	0,116	0,114
	Erro (%)	5,80	5,91	5,52	5,48	5,80	5,79
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,069	4,087	4,098	4,067	4,092	4,089
	Padrão (L/min)	3,990	4,006	4,016	3,985	4,012	4,009
	Erro (L/min)	0,079	0,081	0,082	0,082	0,080	0,080
	Erro (%)	1,97	2,01	2,04	2,06	2,00	1,99
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	5,983	5,985	5,991	6,016	6,102	6,090
	Padrão (L/min)	5,911	5,918	5,924	5,953	6,037	6,020
	Erro (L/min)	0,071	0,067	0,067	0,063	0,065	0,070
	Erro (%)	1,21	1,13	1,13	1,05	1,08	1,16
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,065	8,067	8,094	8,070	8,062	8,083
	Padrão (L/min)	8,020	8,021	8,050	8,024	8,018	8,041
	Erro (L/min)	0,045	0,046	0,044	0,046	0,044	0,042
	Erro (%)	0,56	0,58	0,54	0,57	0,55	0,52
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	11,993	12,035	12,026	12,003	12,022	12,024
	Padrão (L/min)	11,969	12,005	11,995	11,973	11,993	11,991
	Erro (L/min)	0,024	0,030	0,032	0,030	0,029	0,033
	Erro (%)	0,20	0,25	0,26	0,25	0,24	0,28

Tabela C.2.4 – Resultado dos ensaios de caudal – 03-06-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,119	1,171	1,012	1,120	1,158	1,050
	Padrão (L/min)	1,020	1,058	0,924	1,021	1,057	0,943
	Erro (L/min)	0,098	0,112	0,088	0,099	0,100	0,108
	Erro (%)	9,63	10,59	9,54	9,70	9,49	11,40
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,014	2,066	2,097	2,093	2,061	2,094
	Padrão (L/min)	1,895	1,964	1,985	1,988	1,961	1,986
	Erro (L/min)	0,119	0,102	0,112	0,106	0,099	0,108
	Erro (%)	6,28	5,18	5,64	5,32	5,07	5,44
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,049	4,025	4,125	4,110	4,038	4,032
	Padrão (L/min)	3,964	3,953	4,038	4,033	3,960	3,952
	Erro (L/min)	0,085	0,072	0,088	0,077	0,079	0,081
	Erro (%)	2,15	1,82	2,17	1,91	1,99	2,05
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,070	6,074	6,080	6,016	5,915	5,991
	Padrão (L/min)	6,004	6,011	6,013	5,952	5,849	5,926
	Erro (L/min)	0,067	0,063	0,067	0,064	0,066	0,065
	Erro (%)	1,11	1,05	1,12	1,07	1,12	1,09
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,114	8,019	8,084	8,017	8,075	8,097
	Padrão (L/min)	8,071	7,976	8,041	7,970	8,037	8,056
	Erro (L/min)	0,044	0,043	0,042	0,046	0,038	0,041
	Erro (%)	0,54	0,55	0,53	0,58	0,47	0,51
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	12,002	12,007	11,996	11,998	11,999	12,019
	Padrão (L/min)	11,963	11,974	11,970	11,964	11,967	11,993
	Erro (L/min)	0,039	0,033	0,026	0,034	0,032	0,026
	Erro (%)	0,33	0,28	0,22	0,29	0,27	0,22

Tabela C.2.5 – Resultado dos ensaios de caudal – 05-06-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,095	1,161	1,119	1,018	1,133	1,101
	Padrão (L/min)	1,000	1,060	1,019	0,922	1,029	1,001
	Erro (L/min)	0,095	0,102	0,100	0,097	0,103	0,100
	Erro (%)	9,48	9,59	9,79	10,49	10,03	9,99
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,076	2,164	2,103	2,095	2,013	2,074
	Padrão (L/min)	1,966	2,050	1,994	1,985	1,897	1,961
	Erro (L/min)	0,110	0,114	0,108	0,110	0,117	0,113
	Erro (%)	5,59	5,57	5,42	5,57	6,15	5,79
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,086	4,061	4,089	4,032	4,038	4,107
	Padrão (L/min)	4,006	3,983	4,008	3,951	3,957	4,025
	Erro (L/min)	0,080	0,078	0,081	0,082	0,081	0,082
	Erro (%)	1,99	1,96	2,02	2,07	2,05	2,05
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,014	6,050	6,026	5,930	5,991	6,111
	Padrão (L/min)	5,948	5,985	5,960	5,862	5,925	6,047
	Erro (L/min)	0,066	0,065	0,066	0,068	0,066	0,064
	Erro (%)	1,11	1,08	1,11	1,17	1,12	1,06
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,062	8,076	8,083	8,113	8,013	8,077
	Padrão (L/min)	8,018	8,034	8,040	8,067	7,968	8,036
	Erro (L/min)	0,044	0,042	0,043	0,045	0,046	0,041
	Erro (%)	0,55	0,52	0,54	0,56	0,57	0,51
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	12,038	12,038	12,007	11,988	11,998	12,000
	Padrão (L/min)	12,009	12,005	11,974	11,954	11,968	11,970
	Erro (L/min)	0,029	0,033	0,032	0,034	0,029	0,030
	Erro (%)	0,24	0,27	0,27	0,29	0,25	0,25

Tabela C.2.6 – Resultado dos ensaios de caudal – 26-08-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,069	1,061	1,134	1,064	1,059	1,130
	Padrão (L/min)	0,963	0,958	1,030	0,965	0,957	1,029
	Erro (L/min)	0,106	0,103	0,105	0,099	0,102	0,101
	Erro (%)	10,99	10,74	10,18	10,23	10,66	9,80
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,141	2,142	2,161	1,998	2,080	2,089
	Padrão (L/min)	2,042	2,039	2,060	1,882	1,973	1,978
	Erro (L/min)	0,099	0,102	0,101	0,116	0,107	0,112
	Erro (%)	4,86	5,02	4,92	6,16	5,43	5,64
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,031	4,044	4,073	4,023	4,029	4,060
	Padrão (L/min)	3,947	3,962	3,994	3,942	3,947	3,972
	Erro (L/min)	0,084	0,081	0,079	0,082	0,082	0,088
	Erro (%)	2,13	2,05	1,98	2,08	2,08	2,21
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	5,998	6,068	5,991	5,998	6,059	6,056
	Padrão (L/min)	5,934	6,000	5,921	5,931	5,995	5,993
	Erro (L/min)	0,064	0,067	0,070	0,067	0,064	0,063
	Erro (%)	1,08	1,12	1,18	1,13	1,06	1,06
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,096	8,086	8,087	8,081	8,113	8,125
	Padrão (L/min)	8,051	8,044	8,046	8,038	8,074	8,086
	Erro (L/min)	0,045	0,041	0,041	0,043	0,040	0,039
	Erro (%)	0,56	0,52	0,51	0,53	0,49	0,48
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	12,009	11,931	11,923	11,934	11,907	11,923
	Padrão (L/min)	11,974	11,896	11,891	11,903	11,872	11,890
	Erro (L/min)	0,035	0,035	0,032	0,030	0,034	0,033
	Erro (%)	0,30	0,29	0,27	0,26	0,29	0,28

Tabela C.2.7 – Resultado dos ensaios de caudal – 27-08-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,061	1,131	1,059	1,059	1,130	1,069
	Padrão (L/min)	0,956	1,028	0,965	0,956	1,026	0,962
	Erro (L/min)	0,105	0,102	0,095	0,104	0,104	0,108
	Erro (%)	11,01	9,97	9,80	10,86	10,14	11,19
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,998	2,163	2,089	2,141	2,134	2,082
	Padrão (L/min)	1,881	2,058	1,980	2,040	2,035	1,965
	Erro (L/min)	0,117	0,105	0,109	0,101	0,099	0,117
	Erro (%)	6,24	5,11	5,50	4,94	4,88	5,95
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,049	4,028	4,024	4,031	4,044	4,078
	Padrão (L/min)	3,972	3,945	3,941	3,946	3,961	3,994
	Erro (L/min)	0,077	0,082	0,083	0,086	0,083	0,085
	Erro (%)	1,95	2,09	2,11	2,18	2,10	2,12
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,026	6,017	6,090	6,090	6,014	6,039
	Padrão (L/min)	5,962	5,951	6,024	6,022	5,946	5,970
	Erro (L/min)	0,064	0,066	0,066	0,068	0,068	0,069
	Erro (%)	1,08	1,12	1,10	1,13	1,14	1,16
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,087	8,084	8,096	8,088	8,117	8,125
	Padrão (L/min)	8,042	8,038	8,057	8,047	8,071	8,086
	Erro (L/min)	0,045	0,045	0,039	0,042	0,047	0,040
	Erro (%)	0,57	0,56	0,49	0,52	0,58	0,49
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	11,926	11,934	11,934	12,013	11,923	11,906
	Padrão (L/min)	11,898	11,908	11,907	11,980	11,898	11,876
	Erro (L/min)	0,028	0,026	0,026	0,032	0,025	0,029
	Erro (%)	0,24	0,22	0,22	0,27	0,21	0,25

Tabela C.2.8 – Resultado dos ensaios de caudal – 28-08-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,089	1,133	1,078	1,099	1,089	1,141
	Padrão (L/min)	0,981	1,028	0,978	0,999	0,989	1,041
	Erro (L/min)	0,107	0,105	0,100	0,100	0,100	0,100
	Erro (%)	10,95	10,20	10,22	10,01	10,15	9,62
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,153	2,087	1,959	2,083	2,162	2,169
	Padrão (L/min)	2,048	1,982	1,857	1,978	2,055	2,060
	Erro (L/min)	0,105	0,104	0,102	0,104	0,107	0,109
	Erro (%)	5,13	5,27	5,50	5,27	5,21	5,29
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,051	4,031	4,023	4,041	4,028	4,079
	Padrão (L/min)	3,970	3,946	3,941	3,956	3,946	3,995
	Erro (L/min)	0,080	0,085	0,083	0,085	0,082	0,084
	Erro (%)	2,02	2,16	2,10	2,16	2,08	2,11
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,101	5,930	6,018	5,954	6,065	6,042
	Padrão (L/min)	6,039	5,866	5,954	5,888	5,998	5,976
	Erro (L/min)	0,062	0,064	0,064	0,066	0,067	0,066
	Erro (%)	1,03	1,10	1,08	1,12	1,12	1,11
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,136	8,123	8,110	8,094	8,084	8,150
	Padrão (L/min)	8,095	8,078	8,065	8,050	8,041	8,109
	Erro (L/min)	0,041	0,044	0,045	0,044	0,043	0,041
	Erro (%)	0,50	0,55	0,56	0,55	0,53	0,51
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	11,923	11,949	11,949	11,949	11,949	11,904
	Padrão (L/min)	11,890	11,911	11,914	11,919	11,909	11,858
	Erro (L/min)	0,033	0,038	0,035	0,030	0,040	0,046
	Erro (%)	0,28	0,32	0,29	0,25	0,33	0,39

Tabela C.2.9 – Resultado dos ensaios de caudal – 26-10-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,070	1,061	1,061	1,138	1,061	1,130
	Padrão (L/min)	0,962	0,957	0,965	1,028	0,960	1,030
	Erro (L/min)	0,108	0,105	0,096	0,110	0,101	0,100
2 L/min	Erro (%)	11,18	10,94	9,92	10,75	10,56	9,76
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,172	2,118	2,160	2,118	2,086	2,086
	Padrão (L/min)	2,052	2,009	2,059	2,001	1,974	1,976
4 L/min	Erro (L/min)	0,120	0,110	0,100	0,117	0,112	0,110
	Erro (%)	5,84	5,47	4,87	5,85	5,66	5,56
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,081	4,101	4,088	4,031	4,031	4,023
6 L/min	Padrão (L/min)	3,996	4,020	4,010	3,950	3,950	3,945
	Erro (L/min)	0,085	0,080	0,078	0,081	0,081	0,078
	Erro (%)	2,12	2,00	1,94	2,06	2,05	1,99
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
8 L/min	Caudalímetro (L/min)	5,998	6,017	6,008	6,071	6,071	6,063
	Padrão (L/min)	5,933	5,951	5,944	6,005	6,004	5,996
	Erro (L/min)	0,064	0,066	0,064	0,067	0,067	0,067
	Erro (%)	1,09	1,11	1,07	1,11	1,11	1,12
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,094	8,071	8,110	8,020	8,150	8,094
	Padrão (L/min)	8,054	8,029	8,066	7,979	8,105	8,050
	Erro (L/min)	0,039	0,042	0,044	0,041	0,046	0,045
	Erro (%)	0,49	0,52	0,54	0,52	0,56	0,55
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	12,021	12,022	11,940	12,004	11,923	11,908
	Padrão (L/min)	11,990	11,995	11,909	11,972	11,890	11,876
	Erro (L/min)	0,032	0,027	0,031	0,031	0,034	0,032
	Erro (%)	0,26	0,22	0,26	0,26	0,29	0,27

Tabela C.2.10 – Resultado dos ensaios de caudal – 28-10-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,133	1,156	1,123	1,108	1,158	1,109
	Padrão (L/min)	1,025	1,057	1,024	1,008	1,055	1,007
	Erro (L/min)	0,107	0,099	0,099	0,101	0,103	0,102
	Erro (%)	10,48	9,38	9,62	9,99	9,79	10,12
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,031	2,100	2,070	2,093	2,058	2,089
	Padrão (L/min)	1,911	1,993	1,970	1,984	1,957	1,970
	Erro (L/min)	0,120	0,107	0,100	0,110	0,101	0,119
	Erro (%)	6,30	5,35	5,10	5,52	5,14	6,06
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,061	4,091	4,117	4,110	4,038	4,089
	Padrão (L/min)	3,985	4,008	4,033	4,027	3,959	4,011
	Erro (L/min)	0,076	0,083	0,084	0,083	0,079	0,079
	Erro (%)	1,92	2,08	2,09	2,06	2,01	1,96
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,070	6,047	6,042	6,061	6,022	6,043
	Padrão (L/min)	6,001	5,982	5,975	5,993	5,954	5,974
	Erro (L/min)	0,069	0,065	0,067	0,068	0,069	0,069
	Erro (%)	1,15	1,09	1,13	1,14	1,15	1,15
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,110	8,087	8,082	8,101	8,062	8,083
	Padrão (L/min)	8,063	8,041	8,040	8,059	8,020	8,037
	Erro (L/min)	0,047	0,047	0,042	0,042	0,042	0,046
	Erro (%)	0,58	0,58	0,52	0,52	0,53	0,57
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	12,042	12,031	12,020	12,007	12,022	12,000
	Padrão (L/min)	12,013	12,005	11,991	11,975	11,994	11,967
	Erro (L/min)	0,029	0,026	0,029	0,032	0,028	0,033
	Erro (%)	0,25	0,22	0,24	0,27	0,23	0,28

Tabela C.2.11 – Resultado dos ensaios de caudal – 30-10-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,120	1,030	1,108	1,018	1,127	1,108
	Padrão (L/min)	1,019	0,921	1,003	0,919	1,024	1,005
	Erro (L/min)	0,101	0,110	0,105	0,099	0,103	0,103
	Erro (%)	9,87	11,91	10,49	10,80	10,07	10,27
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,159	2,093	2,081	2,162	2,068	2,094
	Padrão (L/min)	2,047	1,984	1,977	2,043	1,956	1,978
	Erro (L/min)	0,112	0,110	0,104	0,120	0,112	0,116
	Erro (%)	5,49	5,53	5,26	5,86	5,72	5,86
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,061	4,029	4,089	4,108	4,038	4,089
	Padrão (L/min)	3,978	3,948	4,013	4,025	3,957	4,009
	Erro (L/min)	0,083	0,081	0,076	0,083	0,081	0,080
	Erro (%)	2,08	2,05	1,90	2,06	2,06	2,00
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,062	6,099	6,093	6,036	6,035	6,043
	Padrão (L/min)	5,995	6,030	6,025	5,967	5,969	5,973
	Erro (L/min)	0,067	0,068	0,069	0,069	0,066	0,070
	Erro (%)	1,11	1,13	1,14	1,16	1,11	1,16
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,102	8,019	8,013	8,076	8,075	8,083
	Padrão (L/min)	8,062	7,975	7,973	8,036	8,028	8,037
	Erro (L/min)	0,040	0,043	0,041	0,040	0,047	0,046
	Erro (%)	0,49	0,54	0,51	0,50	0,58	0,57
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	11,998	12,007	11,996	12,003	11,999	12,000
	Padrão (L/min)	11,971	11,974	11,967	11,971	11,966	11,972
	Erro (L/min)	0,027	0,033	0,029	0,032	0,033	0,028
	Erro (%)	0,23	0,28	0,25	0,27	0,28	0,23

Tabela C.2.12 – Resultado dos ensaios de caudal –28-12-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,159	1,156	1,071	1,018	1,033	1,050
	Padrão (L/min)	1,056	1,057	0,962	0,920	0,933	0,941
	Erro (L/min)	0,104	0,099	0,109	0,098	0,100	0,109
	Erro (%)	9,84	9,32	11,31	10,66	10,74	11,62
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,099	2,081	2,087	2,162	2,118	2,080
	Padrão (L/min)	1,983	1,976	1,969	2,044	2,008	1,978
	Erro (L/min)	0,116	0,105	0,117	0,118	0,110	0,102
	Erro (%)	5,86	5,31	5,95	5,79	5,47	5,15
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,110	4,071	4,089	4,032	4,092	4,038
	Padrão (L/min)	4,030	3,993	4,012	3,941	4,005	3,952
	Erro (L/min)	0,080	0,078	0,077	0,091	0,087	0,087
	Erro (%)	1,99	1,95	1,93	2,31	2,16	2,19
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	5,998	6,003	6,051	6,036	6,101	6,039
	Padrão (L/min)	5,932	5,937	5,982	5,968	6,030	5,971
	Erro (L/min)	0,065	0,066	0,069	0,068	0,071	0,069
	Erro (%)	1,10	1,11	1,15	1,14	1,17	1,15
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,100	8,011	8,069	8,097	8,075	8,077
	Padrão (L/min)	8,057	7,971	8,027	8,057	8,034	8,036
	Erro (L/min)	0,043	0,040	0,042	0,041	0,041	0,041
	Erro (%)	0,53	0,51	0,52	0,51	0,51	0,51
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	11,998	12,031	12,031	11,996	12,022	12,000
	Padrão (L/min)	11,972	12,001	12,000	11,967	11,990	11,967
	Erro (L/min)	0,026	0,030	0,031	0,029	0,032	0,033
	Erro (%)	0,22	0,25	0,26	0,25	0,26	0,28

Tabela C.2.13 – Resultado dos ensaios de caudal –29-12-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,050	1,154	1,133	1,153	1,156	1,033
	Padrão (L/min)	0,941	1,052	1,024	1,057	1,052	0,934
	Erro (L/min)	0,110	0,102	0,109	0,096	0,104	0,099
	Erro (%)	11,65	9,66	10,65	9,07	9,90	10,64
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,019	2,164	2,103	2,013	2,068	2,094
	Padrão (L/min)	1,901	2,051	2,000	1,904	1,962	1,987
	Erro (L/min)	0,118	0,113	0,103	0,109	0,106	0,106
	Erro (%)	6,22	5,51	5,15	5,74	5,42	5,35
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,061	4,038	4,108	4,067	4,092	4,038
	Padrão (L/min)	3,981	3,957	4,024	3,984	4,012	3,954
	Erro (L/min)	0,080	0,081	0,083	0,083	0,080	0,085
	Erro (%)	2,01	2,05	2,07	2,09	1,99	2,14
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,097	5,998	6,080	6,061	6,012	6,028
	Padrão (L/min)	6,027	5,931	6,012	5,992	5,946	5,962
	Erro (L/min)	0,070	0,066	0,069	0,069	0,067	0,066
	Erro (%)	1,16	1,12	1,14	1,16	1,12	1,10
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,065	8,013	8,097	8,079	8,081	8,062
	Padrão (L/min)	8,024	7,968	8,055	8,034	8,040	8,021
	Erro (L/min)	0,041	0,045	0,042	0,046	0,042	0,041
	Erro (%)	0,51	0,57	0,52	0,57	0,52	0,51
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	12,001	12,000	11,988	12,009	12,017	12,024
	Padrão (L/min)	11,973	11,970	11,957	11,977	11,984	11,995
	Erro (L/min)	0,029	0,030	0,031	0,032	0,033	0,029
	Erro (%)	0,24	0,25	0,26	0,26	0,28	0,25

Tabela C.2.14 – Resultado dos ensaios de caudal –30-12-2015

1 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	1,153	1,032	1,156	1,059	1,139	1,130
	Padrão (L/min)	1,053	0,933	1,055	0,957	1,030	1,025
	Erro (L/min)	0,100	0,100	0,101	0,103	0,109	0,105
	Erro (%)	9,50	10,70	9,58	10,75	10,61	10,26
2 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	2,141	2,170	2,070	2,162	2,031	2,080
	Padrão (L/min)	2,038	2,052	1,967	2,047	1,912	1,973
	Erro (L/min)	0,103	0,118	0,103	0,116	0,119	0,107
	Erro (%)	5,05	5,74	5,21	5,65	6,24	5,42
4 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	4,069	4,040	4,108	4,109	4,038	4,089
	Padrão (L/min)	3,987	3,956	4,025	4,028	3,956	4,009
	Erro (L/min)	0,082	0,083	0,083	0,081	0,082	0,080
	Erro (%)	2,05	2,11	2,07	2,02	2,07	1,99
6 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	6,054	6,074	6,025	5,998	6,089	6,041
	Padrão (L/min)	5,988	6,006	5,959	5,929	6,022	5,974
	Erro (L/min)	0,066	0,068	0,066	0,068	0,067	0,067
	Erro (%)	1,10	1,14	1,11	1,16	1,11	1,11
8 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	8,096	8,086	8,069	8,019	8,087	8,083
	Padrão (L/min)	8,053	8,042	8,028	7,977	8,042	8,041
	Erro (L/min)	0,043	0,044	0,041	0,041	0,045	0,042
	Erro (%)	0,53	0,54	0,51	0,52	0,56	0,52
12 L/min		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio
	Caudalímetro (L/min)	11,988	12,000	12,038	11,988	11,923	12,009
	Padrão (L/min)	11,958	11,973	12,010	11,958	11,892	11,980
	Erro (L/min)	0,030	0,027	0,028	0,030	0,031	0,029
	Erro (%)	0,25	0,23	0,23	0,25	0,26	0,24

Anexo C.3 – Listagem das incertezas calculadas para cada dia de ensaio

Tabela C.3.1 – Incertezas expandidas do caudalímetro (L/min) para diferentes caudais

Incertezas Expandidas do Caudalímetro (L/min)		1 L/min	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min	12 L/min
Junho	01 Junho	0,013	0,011	0,018	0,026	0,035	0,052
	03 Junho	0,011	0,012	0,018	0,026	0,035	0,052
	05 Junho	0,007	0,010	0,018	0,026	0,035	0,052
Agosto	26 Agosto	0,007	0,012	0,018	0,026	0,035	0,052
	27 Agosto	0,008	0,012	0,018	0,026	0,035	0,052
	28 Agosto	0,008	0,010	0,018	0,026	0,035	0,052
Outubro	26 Outubro	0,008	0,012	0,018	0,026	0,035	0,052
	28 Outubro	0,007	0,013	0,018	0,026	0,035	0,052
	30 Outubro	0,008	0,011	0,018	0,026	0,035	0,052
Dezembro	28 Dezembro	0,008	0,012	0,018	0,026	0,035	0,052
	29 Dezembro	0,008	0,011	0,018	0,026	0,035	0,052
	30 Dezembro	0,008	0,012	0,018	0,026	0,035	0,052

Tabela C.3.2 – Incertezas expandidas do caudalímetro (%) para diferentes caudais

Incertezas Expandidas do Caudalímetro (%)		1 L/min	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min	12 L/min
Junho	01 Junho	1,32	0,53	0,45	0,44	0,43	0,43
	03 Junho	1,06	0,59	0,46	0,44	0,43	0,43
	05 Junho	0,75	0,52	0,45	0,44	0,43	0,43
Agosto	26 Agosto	0,74	0,58	0,45	0,44	0,44	0,43
	27 Agosto	0,79	0,60	0,45	0,44	0,44	0,43
	28 Agosto	0,75	0,52	0,45	0,44	0,44	0,44
Outubro	26 Outubro	0,84	0,58	0,45	0,44	0,44	0,43
	28 Outubro	0,75	0,63	0,45	0,44	0,43	0,43
	30 Outubro	0,77	0,55	0,45	0,44	0,43	0,43
Dezembro	28 Dezembro	0,82	0,58	0,46	0,44	0,43	0,43
	29 Dezembro	0,85	0,55	0,45	0,44	0,43	0,43
	30 Dezembro	0,76	0,60	0,45	0,44	0,43	0,43

Tabela C.3.3 – Incertezas combinadas e expandidas – 01-06-2015

01 Junho 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,005	0,54	6,284	2,45	0,013	1,32
2	0,005	0,27	77,738	1,99	0,011	0,53
4	0,009	0,22	61,812	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,936	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,005	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,21	51,480	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.4 – Incertezas combinadas e expandidas – 03-06-2015

03 Junho 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,005	0,48	10,276	2,23	0,011	1,06
2	0,006	0,29	33,551	2,03	0,012	0,59
4	0,009	0,23	62,434	2,00	0,018	0,46
6	0,013	0,22	55,378	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,213	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,22	51,761	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.5 – Incertezas combinadas e expandidas – 05-06-2015

05 Junho 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,37	76,413	1,99	0,007	0,75
2	0,005	0,26	86,169	1,99	0,010	0,52
4	0,009	0,22	61,943	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,264	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,046	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,22	51,363	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.6 – Incertezas combinadas e expandidas – 26-08-2015

26 Agosto 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,37	85,283	1,99	0,007	0,74
2	0,006	0,29	38,445	2,02	0,012	0,58
4	0,009	0,23	62,810	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,719	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,070	2,01	0,035	0,44
12	0,026	0,22	51,335	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.7 – Incertezas combinadas e expandidas – 27-08-2015

27 Agosto 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,39	44,921	2,02	0,008	0,79
2	0,006	0,29	27,971	2,05	0,012	0,60
4	0,009	0,23	62,858	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,344	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,306	2,01	0,035	0,44
12	0,026	0,22	51,393	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.8 – Incertezas combinadas e expandidas – 28-08-2015

28 Agosto 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,38	73,399	1,99	0,008	0,75
2	0,005	0,26	89,647	1,99	0,010	0,52
4	0,009	0,23	62,037	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,433	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	52,970	2,01	0,035	0,44
12	0,026	0,22	51,872	2,01	0,052	0,44

Tabela C.3.9 – Incertezas combinadas e expandidas – 26-10-2015

26 Outubro 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,41	30,104	2,04	0,008	0,84
2	0,006	0,29	36,323	2,03	0,012	0,58
4	0,009	0,23	62,556	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,256	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,177	2,01	0,035	0,44
12	0,026	0,22	51,378	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.10 – Incertezas combinadas e expandidas – 28-10-2015

28 Outubro 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,37	77,000	1,99	0,007	0,75
2	0,006	0,30	22,111	2,07	0,013	0,63
4	0,009	0,23	63,036	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,233	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,207	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,21	51,416	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.11 – Incertezas combinadas e expandidas – 30-10-2015

30 Outubro 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,38	58,077	2,00	0,008	0,77
2	0,006	0,28	56,924	2,00	0,011	0,55
4	0,009	0,22	62,685	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,216	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,316	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,22	51,408	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.12 – Incertezas combinadas e expandidas – 28-12-2015

28 Dezembro 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,40	34,640	2,03	0,008	0,82
2	0,006	0,29	38,239	2,02	0,012	0,58
4	0,009	0,23	62,441	2,00	0,018	0,46
6	0,013	0,22	55,403	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	52,919	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,21	51,401	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.13 – Incertezas combinadas e expandidas – 29-12-2015

29 Dezembro 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,41	27,216	2,05	0,008	0,85
2	0,006	0,28	56,060	2,00	0,011	0,55
4	0,009	0,22	62,207	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,387	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	53,099	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,22	51,320	2,01	0,052	0,43

Tabela C.3.14 – Incertezas combinadas e expandidas – 30-12-2015

30 Dezembro 2015	Incerteza Combinada		Grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e Fator de expansão (k)		Incerteza Expandida	
Caudal (L/min)	uC cal (L/min)	uC cal (%)	V_{ef}	k	U (L/min)	U (%)
1	0,004	0,38	64,565	2,00	0,008	0,76
2	0,006	0,29	30,295	2,04	0,012	0,60
4	0,009	0,22	61,746	2,00	0,018	0,45
6	0,013	0,22	55,207	2,00	0,026	0,44
8	0,017	0,22	52,994	2,01	0,035	0,43
12	0,026	0,22	51,310	2,01	0,052	0,43

Anexo C.4 – Gráficos da repetibilidade para cada dia de ensaios

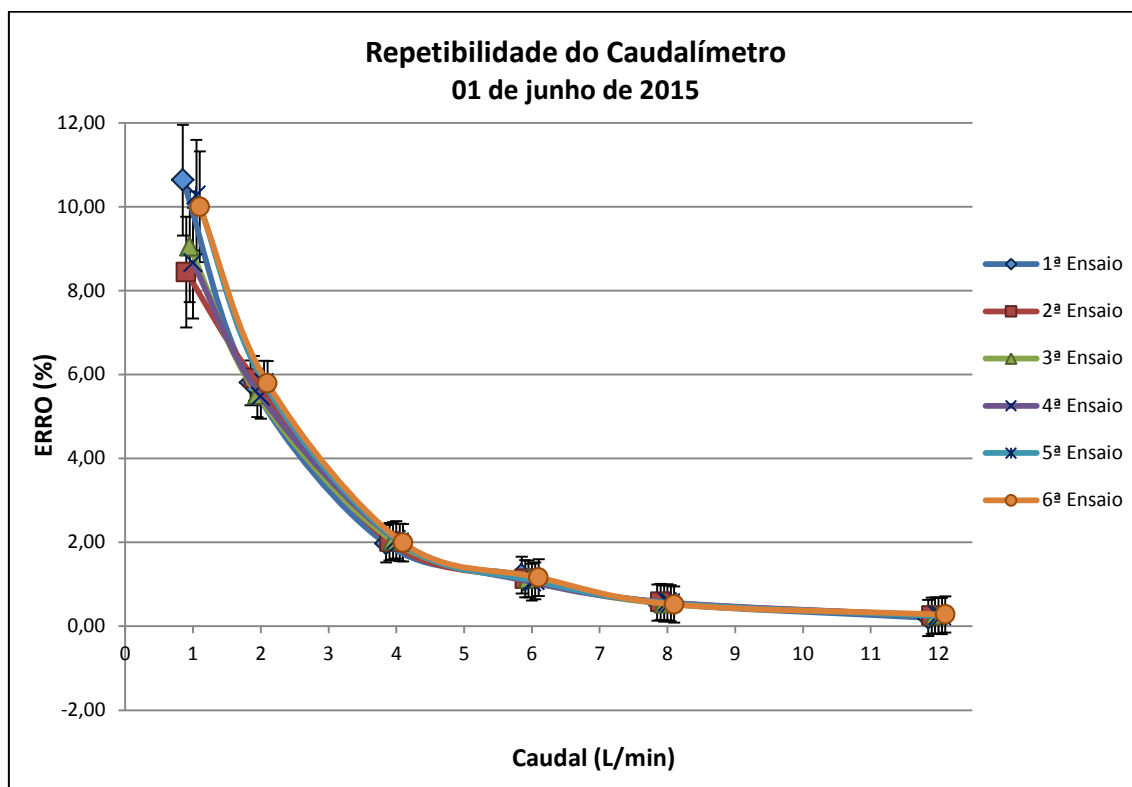


Gráfico C.4.1 – Repetibilidade do caudalímetro – 01 de junho de 2015

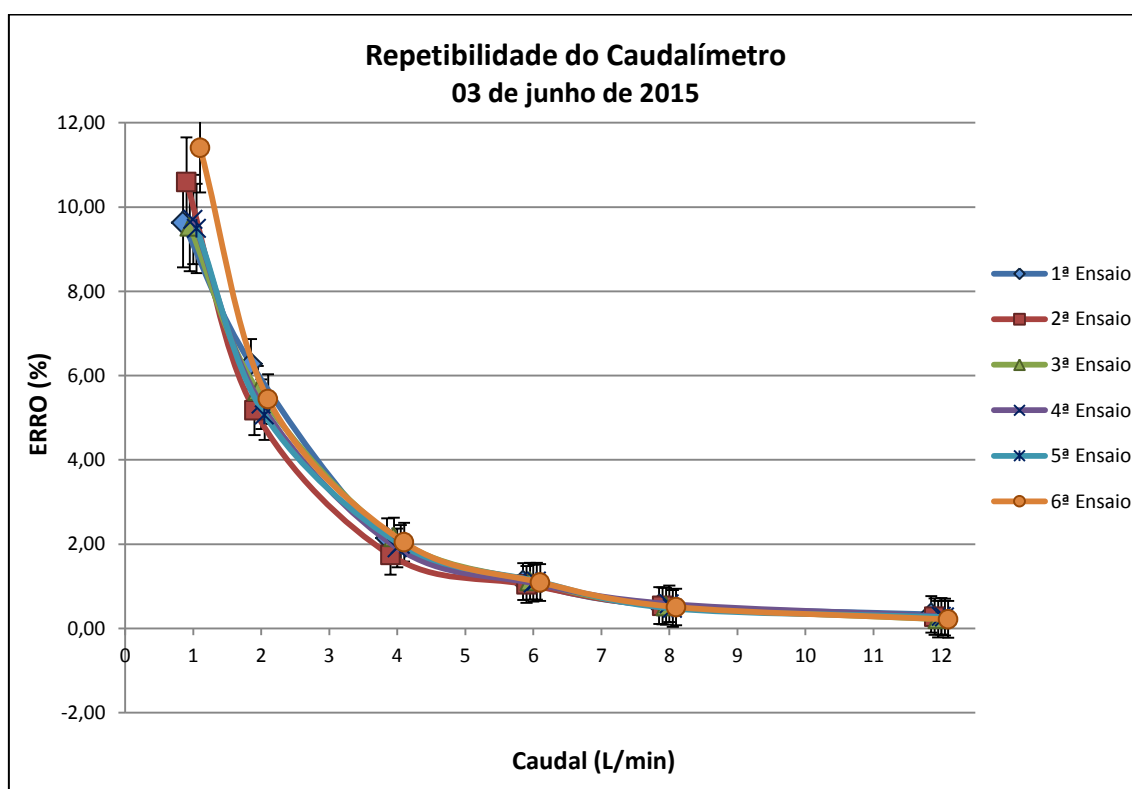


Gráfico C.4.2 – Repetibilidade do caudalímetro – 03 de junho de 2015

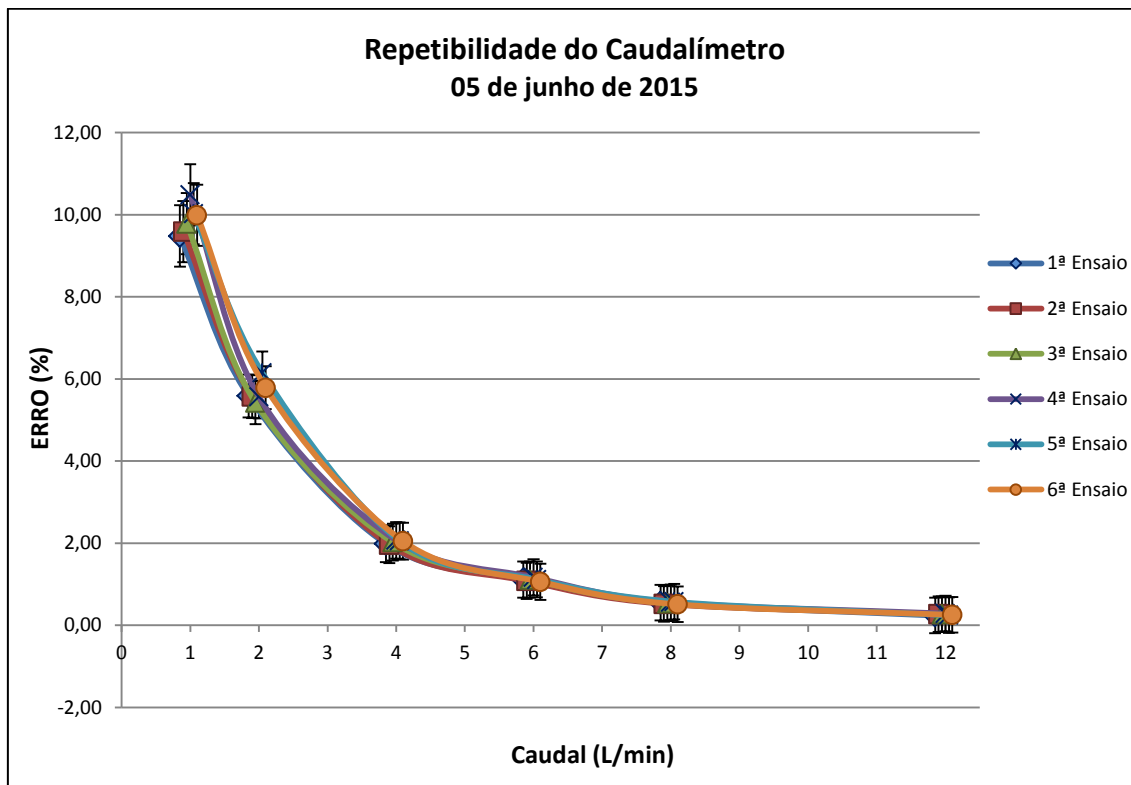


Gráfico C.4.3 – Repetibilidade do caudalímetro – 05 de junho de 2015

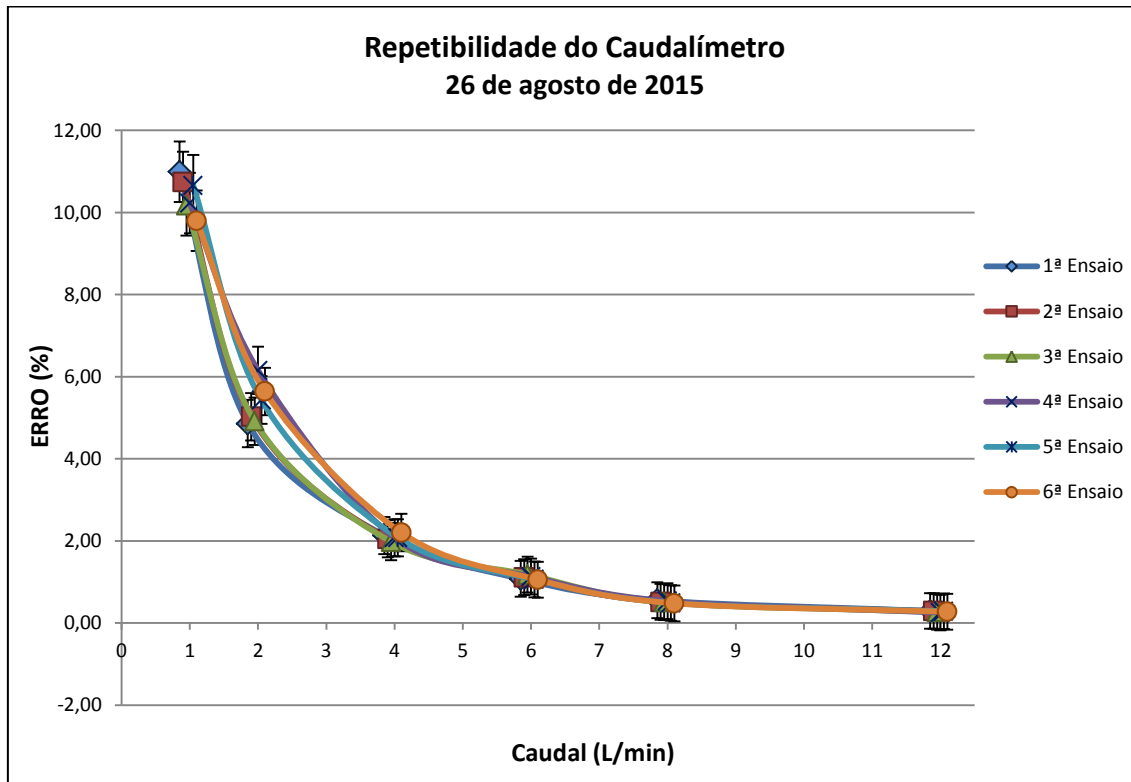


Gráfico C.4.4 – Repetibilidade do caudalímetro – 26 de agosto de 2015

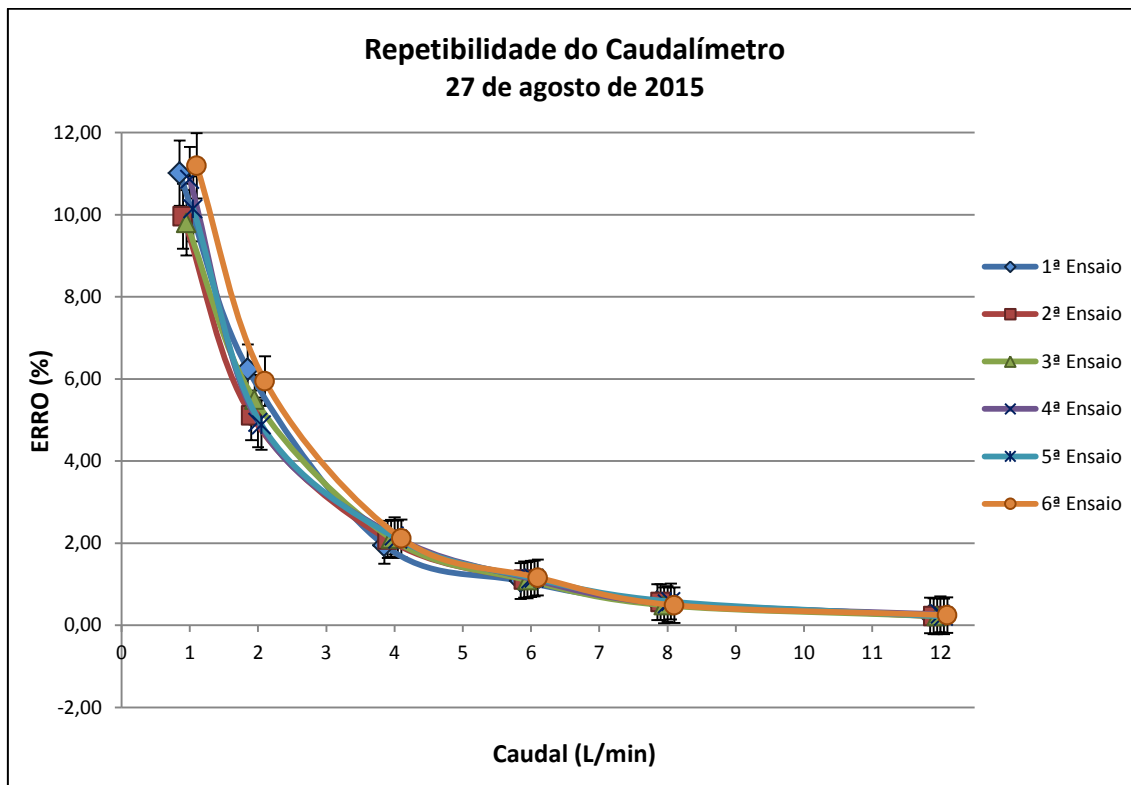


Gráfico C.4.5 – Repetibilidade do caudalímetro – 27 de agosto de 2015

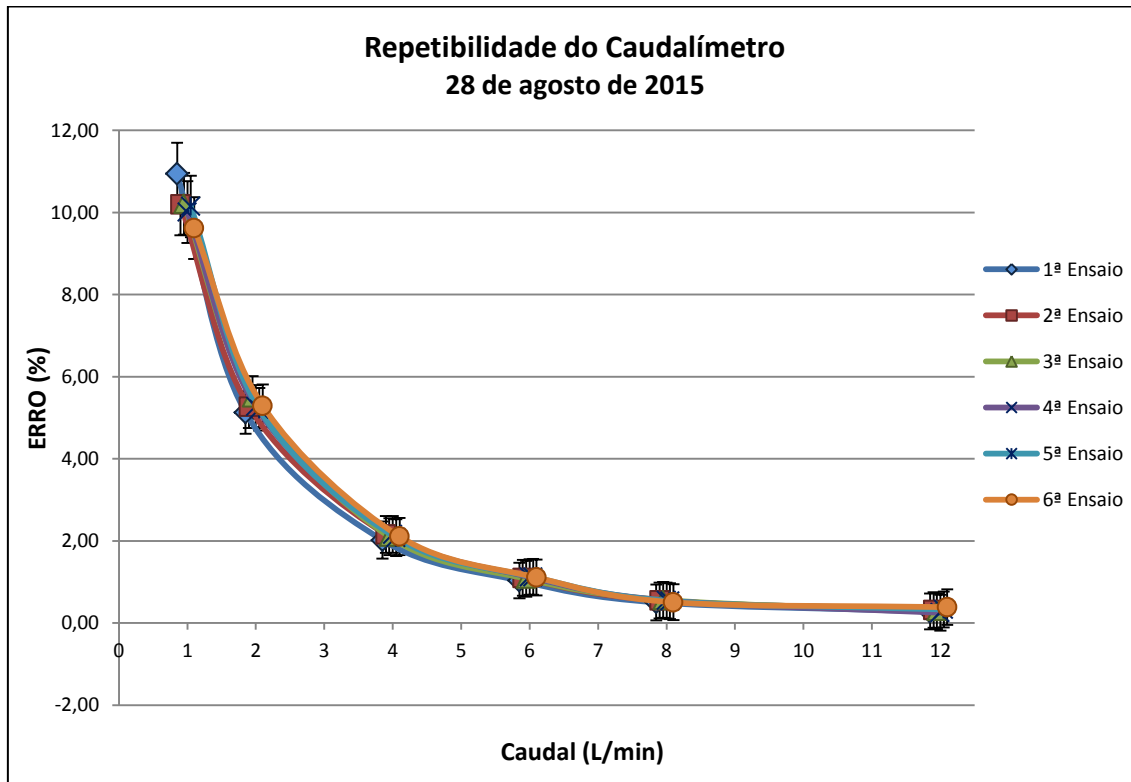


Gráfico C.4.6 – Repetibilidade do caudalímetro – 28 de agosto de 2015

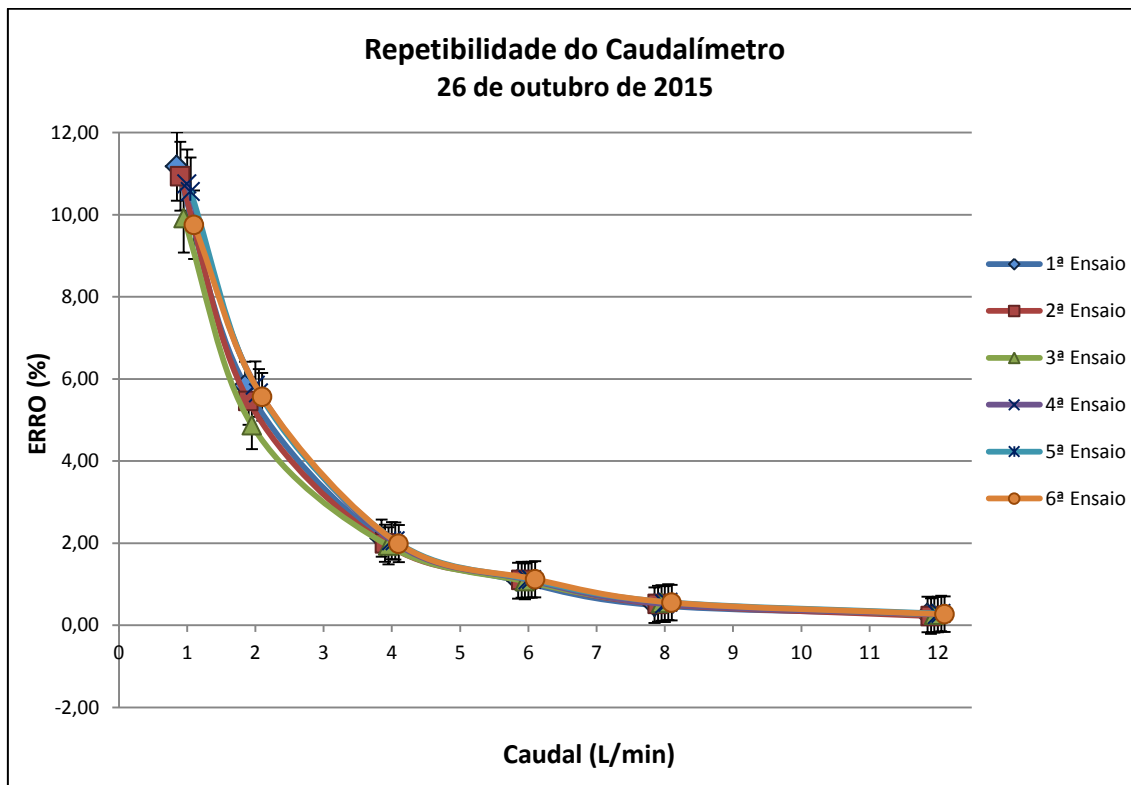


Gráfico C.4.7 – Repetibilidade do caudalímetro – 26 de outubro de 2015

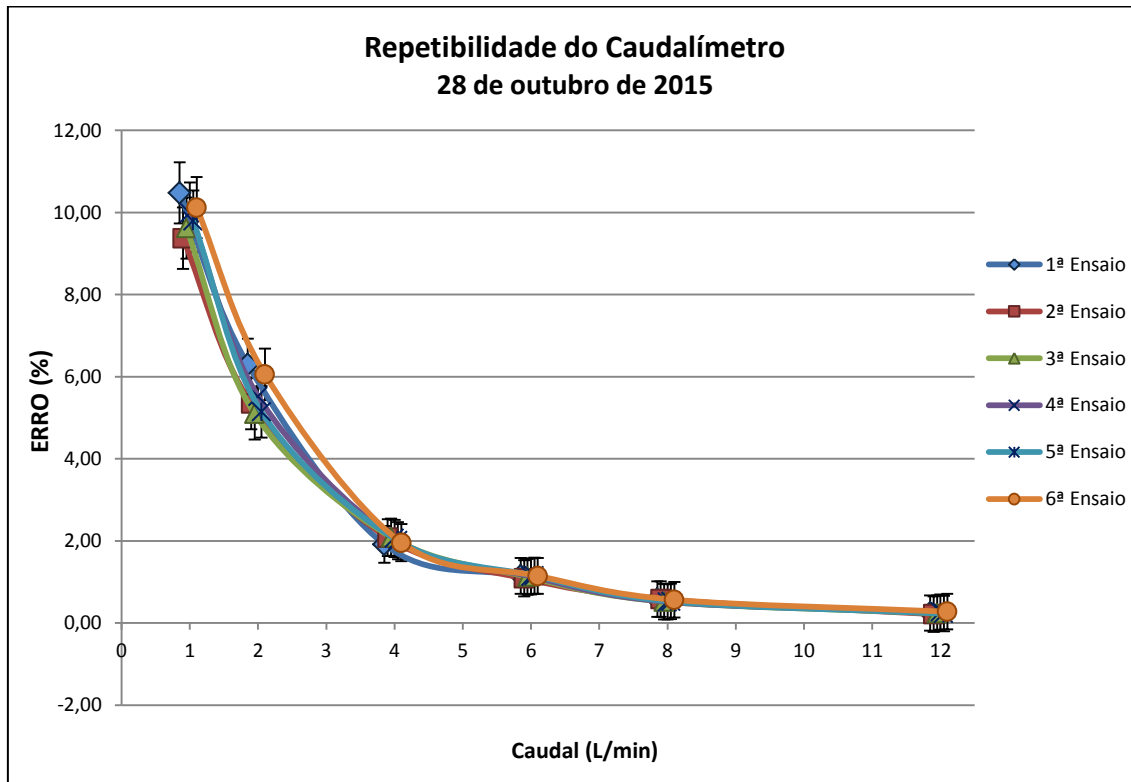


Gráfico C.4.8 – Repetibilidade do caudalímetro – 28 de outubro de 2015

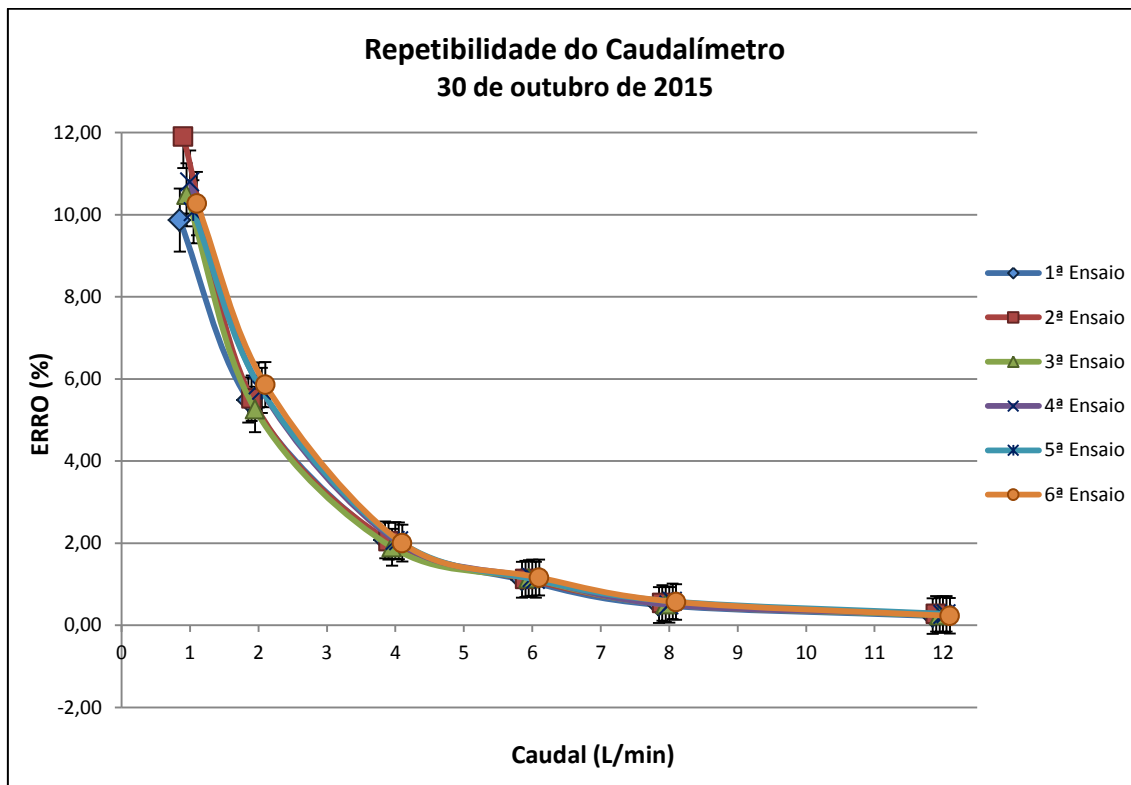


Gráfico C.4.9 – Repetibilidade do caudalímetro – 30 de outubro de 2015

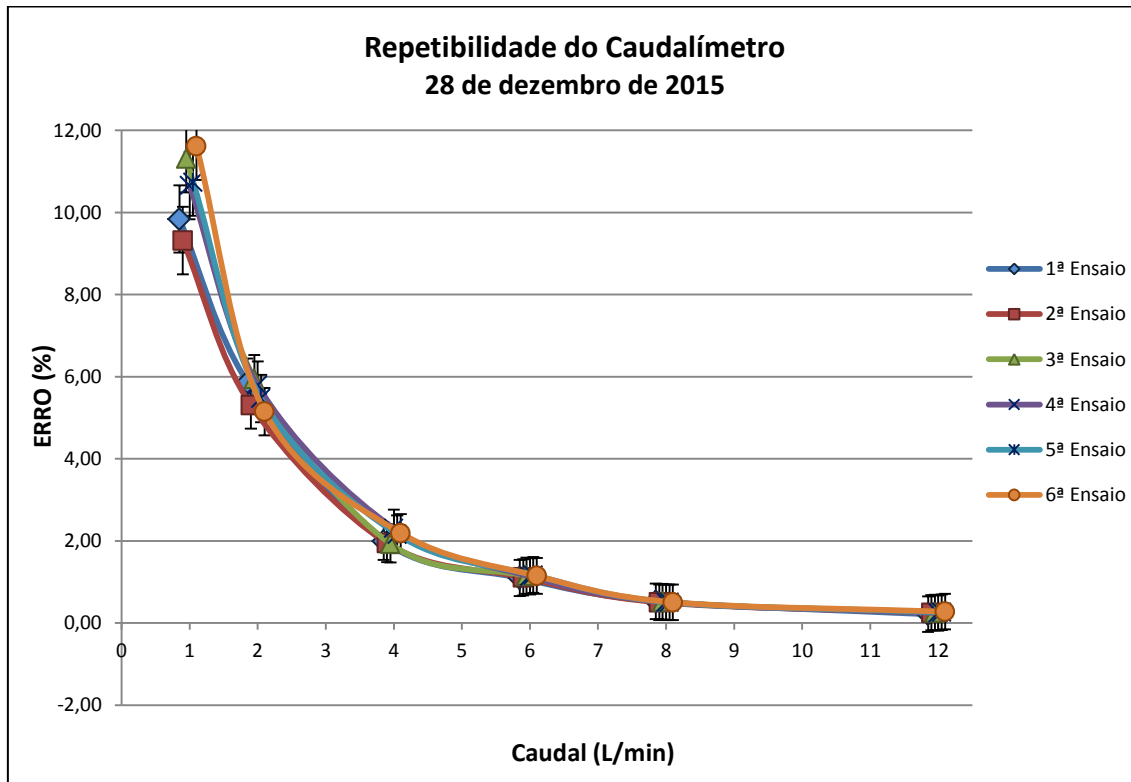


Gráfico C.4.10 – Repetibilidade do caudalímetro – 28 de dezembro de 2015

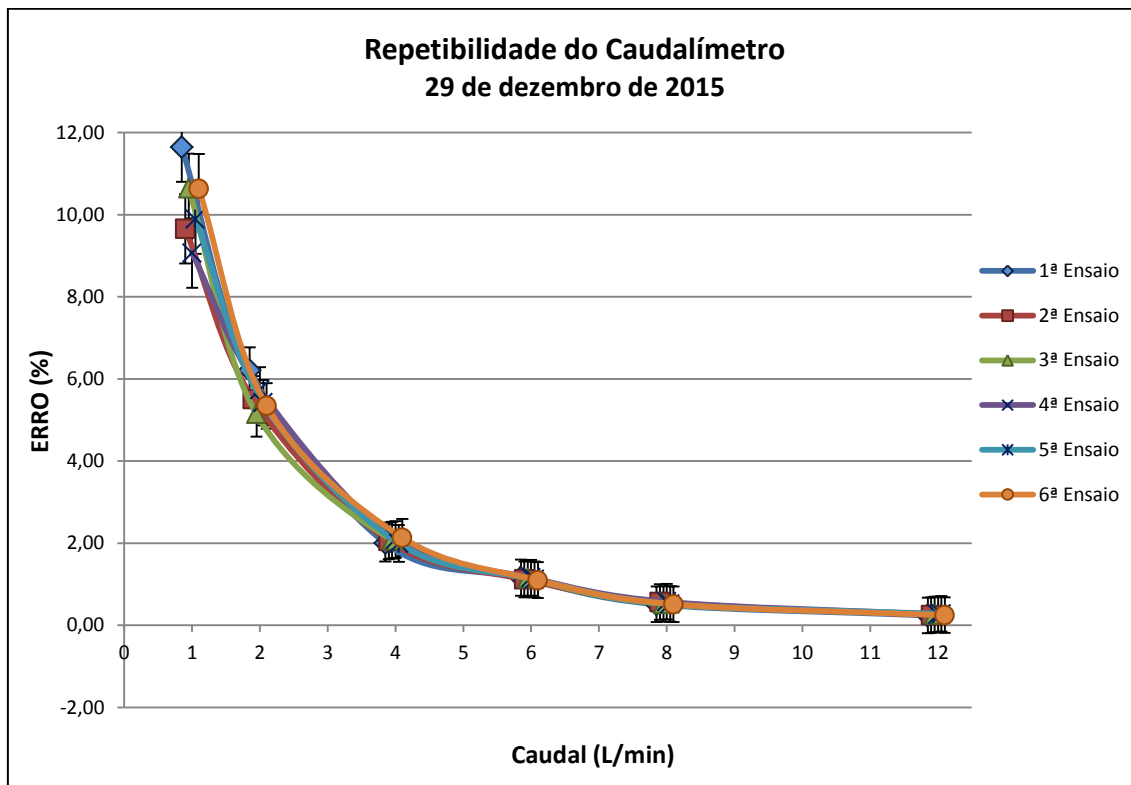


Gráfico C.4.11 – Repetibilidade do caudalímetro – 29 de dezembro de 2015

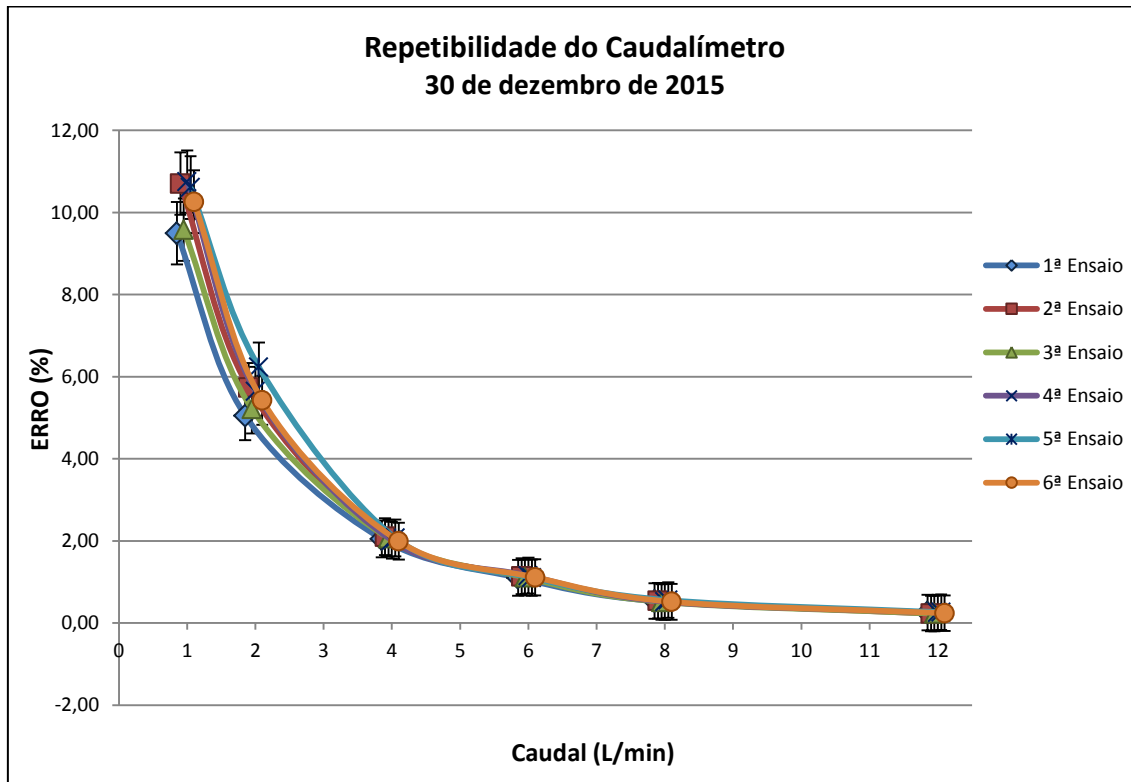


Gráfico C.4.12 – Repetibilidade do caudalímetro – 30 de dezembro de 2015

Anexo C.5 – Gráficos da reprodutibilidade para cada mês

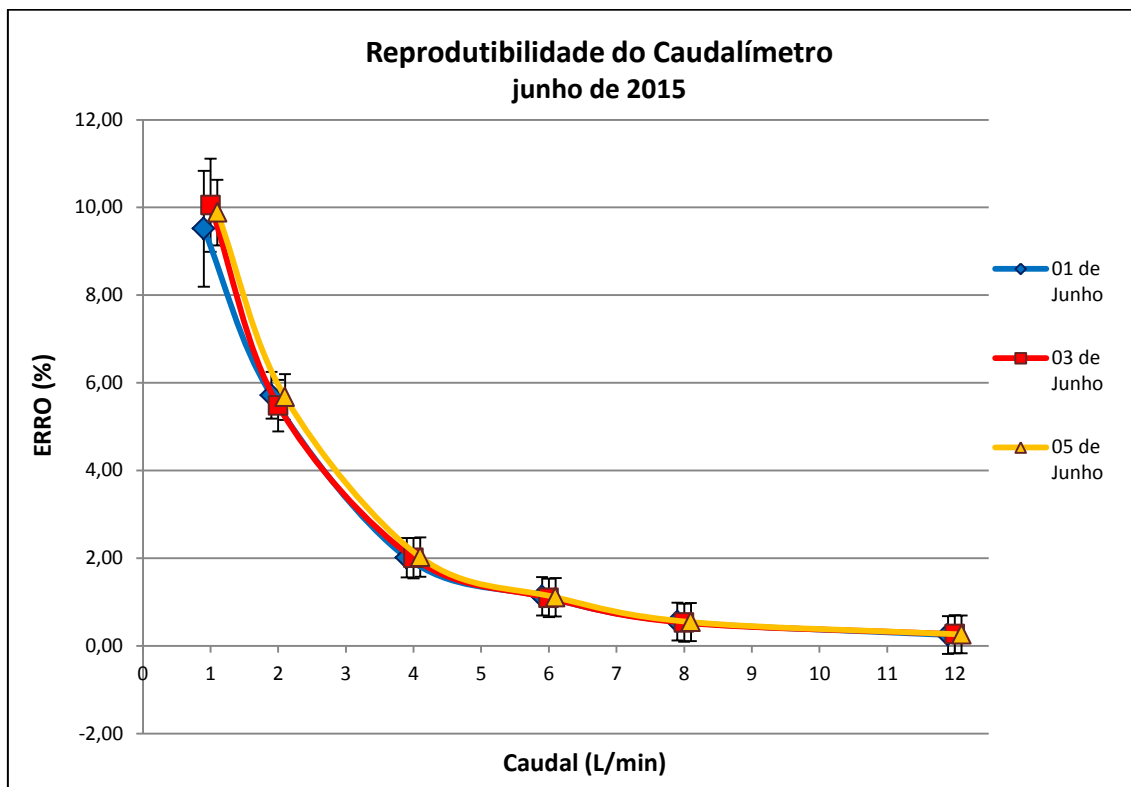


Gráfico C.5.1 – Reprodutibilidade do caudalímetro – junho de 2015

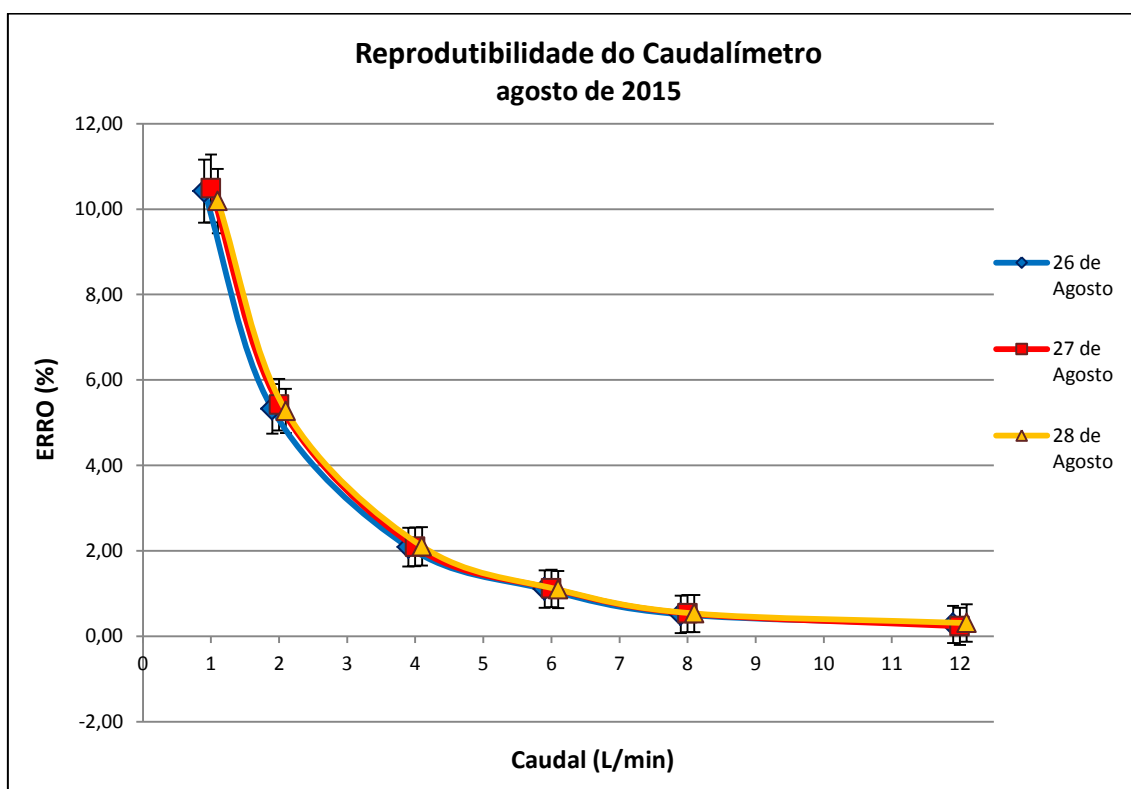


Gráfico C.5.2 – Reprodutibilidade do caudalímetro – agosto de 2015

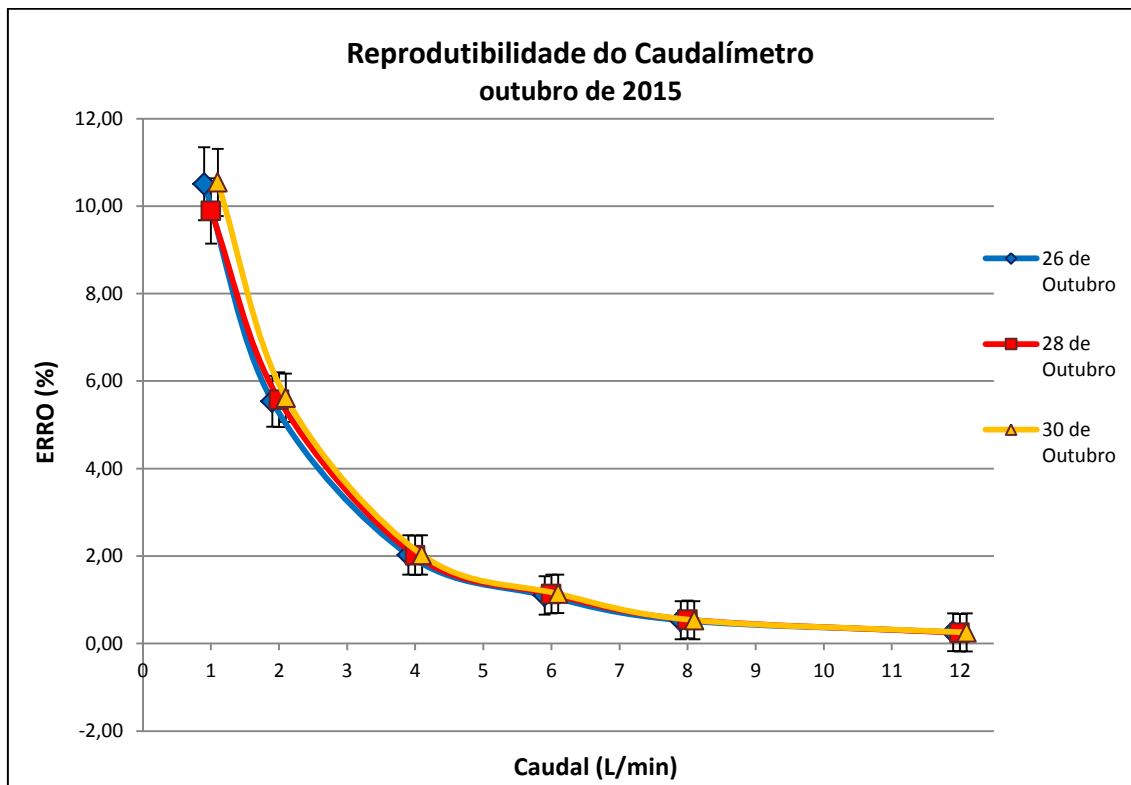


Gráfico C.5.3 – Reprodutibilidade do caudalímetro – outubro de 2015

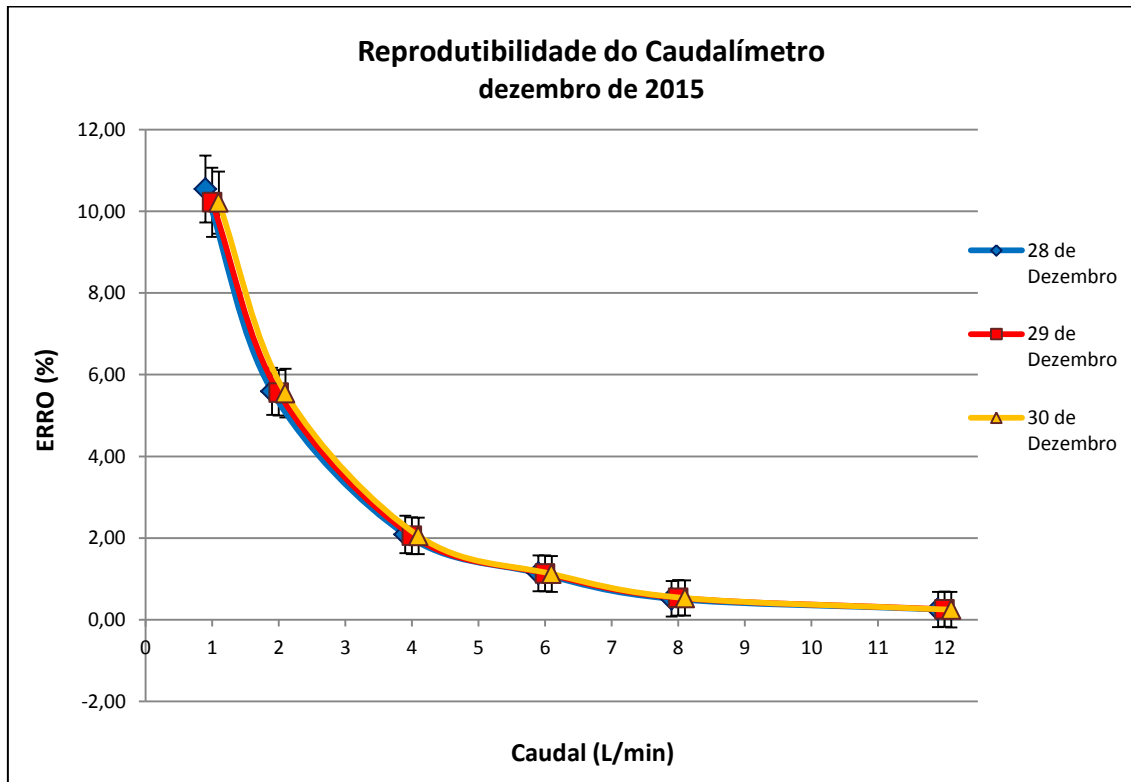


Gráfico C.5.4 – Reprodutibilidade do caudalímetro – dezembro de 2015

Anexo D – Certificados de calibração dos equipamentos


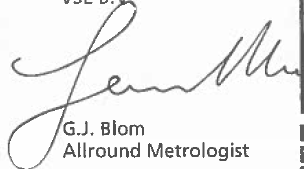


 VSL Dutch Metrology Institute		Certificate Certificate number : 3252965 Projectnumber : 9301759 Page 1 of 2	
Applicant	Insituto Portugues da Qualidade Rua Antonio Gao 2 2829513 Monte da Caparica PORTUGAL		
Submitted	A Piston prover Manufacturer : Brooks Instrument B.V. Type : 1068/B2B2A Serial number : V00784 /01 ID-Code : MQI/LGR28		
Calibration method	The measured volume of the Piston Prover is compared with the National Standard of Length measurement and Time measurement. The calibration is carried out with air under atmospheric pressure at an ambient temperature of $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ and a relative humidity less than 5%. The dynamic pressure under the piston and the inlet-temperature are used for the determination of the reference flow rate.		
Date of calibration	13 October 2009		
Result	The results of the calibration are presented on page 2 of 2. The reported uncertainty of measurement is based on the standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$.		
Traceability	The results of the calibration services of NMI VSL are traceable to primary and/or (inter)nationally accepted measurement standards.		
Delft, 15 October 2009 VSL B.V.  G.J. Blom Allround Metrologist		 VSL Dutch Metrology Institute	
<small> This certificate is consistent with Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see http://lkcdb.bipm.fr). </small>			
VSL B.V. Thijssseweg 11, 2629 JA Delft (NL) P.O. Box 654, 2600 AR Delft (NL) T +31 15 269 15 00 F +31 15 261 29 71 I www.vsl.nl		 <small> This certificate is issued under the provision that no liability is accepted and that the applicant gives warranty for each responsibility against third parties. Reproduction of the complete certificate is permitted. Parts of this certificate may only be reproduced after written permission. </small>	

Figura D.1 – Certificado de calibração do *piston prover* (página 1 de 2)



Dutch
Metrology
Institute

Certificate number : 3252965

Projectnumber : 9301759

Page 2 of 2

Instrument
 Manufacturer : Brooks Instrument B.V.
 Type : 1068/B2B2A
 Serial number : V00784 /01
 ID-Code : MQI/LGR28
 Max volume : 12000 ml

Display unit
 Manufacturer : Brooks Instrument B.V.
 Serial number : V00784/01
 ID-Code : ---

Results

Sensor	Nominal volume	Calculated volume	Reference flow rate	Total uncertainty	Number of measurements
	[ml]	[ml]	[l/h]	[%]	[-]
1	500	501,1	96 / 194	0,25	16
2	1000	1011	96 / 194	0,24	16
3	2000	2031	96/194/345/768	0,24	36
4	4000	4042	96/194/345/768	0,23	36
5	8000	8101	345 / 768	0,23	20
6	12000	12130	345 / 768	0,23	20


The uncertainty in the determination of the reference flow rate does not exceed 0,23 %.

The dynamic pressure under the piston equals 355 Pa.

The deviation of the temperature transmitter of the piston prover equals $(-0,50 \pm 0,05) ^\circ\text{C}$. (deviation = $T_{\text{dut}} - T_{\text{ref}}$)



Figura D.2 – Certificado de calibração do *piston prover* (página 2 de 2)



Bronkhorst®
HIGH-TECH

CALIBRATION CERTIFICATE

FLUID NO. 1 OF 1

CERTIFICATE NO. BHTG18/1800214

Calibration by comparison
Calibration date: 5 Mar 2015

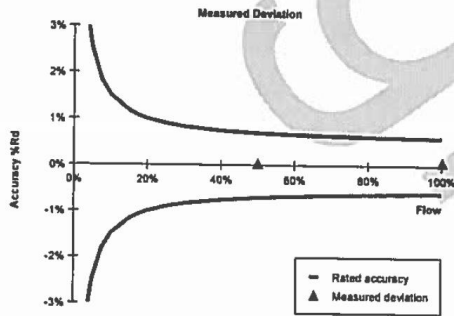
We hereby certify that the instrument mentioned below has been calibrated in accordance with the stated values and conditions. The calibration standards used are traceable to national standards of the Dutch Metrology Institute VSL.

Calibrated instrument		Calibration standard	
Type	Flow controller (D)	Type	Piston Prover
Serial number	M15201791A	Serial number	80050
Model number	F-201CV-10K-AAD-22-V	Certificate no.	BCC001/1660365
Rated accuracy*	±(0.5%Rd + 0.1%FS)	Uncertainty	±0.3% Rd

Customer conditions		Calibration conditions	
Fluid	N2	Fluid	AIR
Flow	12.00 l/min	Flow	12.00 l/min (equivalent flow)
Pressure	3.0 bar (g)	Pressure	5.0 bar (a)
Temperature	20.0 °C	Temperature	23.1 °C
		Atm. pressure	1035.0 hPa (a)

Calibration and conversion results

Output signal	Customer flow** N2	Equivalent flow** AIR	Reference flow AIR	Measured deviation*	Measurement uncertainty*
100.18%	12.02 l/min	12.02 l/min	12.01 l/min	0.08 % Rd	0.4 % Rd
49.97%	5.997 l/min	5.994 l/min	5.992 l/min	0.04 % Rd	0.4 % Rd
0.00%	0.000 l/min	0.000 l/min	0.000 l/min	-	-



Notes

Flow unit l/min is defined at conditions 0.00 °C, 1013.25 hPa (a).

* Rated accuracy, measured deviation and measurement uncertainty are specified under calibration conditions in digital mode.

** The customer flow at customer conditions is converted to equivalent flow at calibration conditions using Bronkhorst High-Tech FLUIDAT® software.

Measurement uncertainties are based upon 95% (k=2) confidence limits. Although the item calibrated meets the specifications and performance at the time of calibration, due to any number of factors, this does not imply continuing conformance to the specifications.

Calibrator I.We.

QC A.F.K.

Date 11 Mar 2015

Signed

Multical V2.05

FLUIDAT® V5.73 (Database: 05-05-1999)

Report V1.13

Figura D.3 – Certificado de calibração do caudalímetro

